

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Návrh úprav technologie zápustkového kování

Proposal of Drop Forging Technology Modifications

Student:

Vojtěch Navrátil

Osobní číslo:

NAV0163

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Hilšer

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Navrátil**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh úprav technologie zápusťkového kování**
Proposal of Drop Forging Technology Modifications
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu problematiky zápusťkového kování.
- 2) Proveďte detailní rozbor aktuálního stavu kování zadaného dílce.
- 3) Navrhněte případná konstrukční nebo technologická opatření pro možnost optimalizovat kovací proces.
- 4) Navržené úpravy verifikujte provedením MKP/MKO analýzy.
- 5) Proveďte celkové hodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

HAŠEK, V. a kol. *Kování*. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 732 s.
ELFMARK, J. a kol. *Tváření kovů*. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1992. 524 s. ISBN 80-03-00651-1.
KOTOUČ, J. a kol. *Tvářecí nástroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
HOSFORD, W. F. a kol. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 4 vyd. New York: Cambridge University Press, 2011. 344 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
JÍLEK, L. Mají výkovky budoucnost?. *Kovárenství*. 2019, Vol. 68, pp. 3-6. ISSN 1213-9289.
ČERMÁK, J. a kol. Směry rozvoje kovárenského průmyslu. *Kovárenství*. 2019, Vol. 68, pp. 7-15. ISSN 1213-9289.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Hilšer**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o technických parametrech Výkovku získaných od firmy UNEX s. r. o., Olomouc, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....
Podpis studenta

Prohlášení spolupracující osoby

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských studijních programech VŠB-TU Ostrava.

Spolupracující osoba:

UNEX a. s. – závod Olomouc

Řepčinská 35/86


779 11 Olomouc

IČ: 45192049

Jméno a příjmení oprávněné osoby:

Vedoucí technologie pan Ing. Tomáš Brumar

V Olomouci dne 9. ledna 2020.

 **UNEX**
Korespondenční adresa: Brničko 1032, 783 61 Uničov
Sídlo: Porážková 1424/20, Moravská Ostrava
IČ: 45192049



Podpis oprávněné osoby

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020

Vojtěch Navrátil

Litovel, Rozvadovice 22



.....
Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

NAVRÁTIL, V. *Návrh úprav technologie zápusťkového kování: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 47 s. Vedoucí práce: Hilšer, O.

Práce je zaměřena na rozbor problematiky zápusťkového kování tvarové součásti s ohledem na možnost optimalizace již nastaveného konstrukčního řešení a technologického postupu. Práce obsahuje dvě samostatné části. V kapitolách, zabývajících se teoretickými aspekty kování a práce v kovárnách, se zaměřením na možný směr vývoje kovárenství, jsou uvedeny v teoretické části bakalářské práce. Praktická část obsahuje popis kovaného dílce a rozbor současného stavu postupu jeho výroby. Na základě numerické simulace procesu kování a zatížení zápusťek byla, s ohledem na optimalizaci, provedena konstrukční tvaru předkovku a kovacích nástrojů. Verifikace navržených úprav byla shodně s původním řešením provedena využitím simulačního programu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

NAVRÁTIL, V. *Proposal of Drop Forging Technology Modification: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2020, 47 p. Thesis head: Hilšer, O.

The work is focused on the analysis of the issue of drop forging of the shaped part regarding the possibility of optimizing the already set design solution and technological process. The work contains two separate parts. In the chapters dealing with the theoretical aspects of forging and work in forges, focusing on the possible direction of development of forging, are presented in the theoretical part of the thesis. The practical part contains a description of the forged part and an analysis of the current state of its production process. Based on the numerical simulation of the forging process and die loading, the structural shape of the forging and forging tools was performed regarding to optimization. Verification of the proposed modifications was performed in accordance with the original solution using a simulation program.

Obsah

Seznam použitých zkratk, značek a symbolů.....	8
Úvod.....	9
1 Aktuální směr vývoje práce v kovárenství.....	10
1.1 Inovace prací v kovárnách.....	12
1.1.1 Nové druhy materiálů výkovků.....	12
1.1.2 Manipulace s materiálem v kovárnách.....	13
1.1.3 Předkovací operace v kovárnách.....	14
1.1.4 CAD/CAM systémy v kovárnách	15
1.1.5 Numerická simulace kovacích operací.....	15
2 Cíle práce	17
3 Rozbor aktuálního stavu kování zadaného výkovku	18
3.1 Simulace procesu kování – původní varianta.....	20
3.2 Simulace zatížení zápustek – původní varianta.....	23
4 Návrh konstrukčních úprav	31
4.1 Simulace procesu kování – nové provedení.....	31
4.2 Simulace zatížení zápustek – nové provedení.....	33
5 Celkové hodnocení dosažených výsledků.....	39
Závěr.....	43
Seznam použité literatury.....	45
Seznam příloh	47

Seznam použitých zkratk, značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
CAD	Počítačová podpora designu	
CAM	Počítačová podpora výroby	
FV	Metoda konečných objemů	
PKV	Příčné klínové válcování	
A	Tažnost	[%]
F	Síla F	[N]
HRC	Tvrdost dle Rockwella	[-]
l	Délka	[m]
m	Hmotnost	[kg]
P	Výkon	[W]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
T	Teplota dle stupnice Celsia	[°C]
T	Teplota dle stupnice Kelvina	[K]

Úvod

Kování představuje nejstarší technologii výroby součástí, která je stará již více než 2000 let a přitom je stále používána. V porovnání s výrobou pomocí metod třískového obrábění nedochází při kování (obecně tváření) k významné ztrátě materiálu a výrobní časy umožňují rychlou produkci velkého množství výrobků. Aby byly výhody kování zachovány, musí se tato výrobní oblast neustále inovovat, aby kovárny byly schopny pokrýt požadavky zákazníků. Progres je patrný nejen v používaných strojích, kde buchary byly nahrazeny mechanickými lisami a jednoúčelovými stroji pro předkovací operace, ale současně lze progres spatřit také v oblasti manipulátorů a materiálů, které jsou používány na výkovky. Stále platí, že velké procento výkovků je z nízko-uhlíkových ocelí, ale současně lze vyrobit výkovky z vysokolegovaných ocelí a slitin neželezných kovů, jako jsou slitiny hliníku, hořčíku nebo titanu. Zkvalitnění a ulehčení práce v kovárnách představuje možnost numerické simulace navržených postupů a tato představuje klíčovou a často klíčovou část technické přípravy výroby a vývoj simulačních programů do budoucna slibuje rozšíření na problematiku predikce vývoje mikrostruktury po kování nebo po tepelném zpracování, což s sebou přináší úspory na výzkum.

Tato práce je zaměřena na využití simulace procesu zápusťkového kování tvarové součásti dílce drtiče tuhých odpadů, který je již kován ve společnosti UNEX, a. s.

1 Aktuální směr vývoje práce v kovárenství

Kování jako technologie zpracování kovů je známá již velmi dlouhou dobu a její historie sahá před počátek našeho letopočtu. Po celou dobu, kdy je tato technologie známá zůstal její princip zachován a změn doznaly povětšinou stroje a nástroje, které jsou pro kování využívány.

Kování, jako technologie zpracování kovů je rozdělena na dvě základní skupiny a to na:

- **Volné kování**
- **Zápustkové**

Při volném kování dochází k volnému přemístění materiálu ve směru nejmenšího odporu pod účinkem kovací síly kladiva kováře nebo kovacího stroje. Z tohoto důvodu lze volné kování rozdělit na ruční a strojní. Při ručním kování kove kovář na kováčtině ručním kovářským nástrojem. V dnešní době se v průmyslové praxi ruční kování využívá minimálně a spíše se s ním lze setkat v rámci prací uměleckých kovářů. V případě volného strojního kování dochází k postupnému prokování velkých válcovaných polotovarů nebo ingotů (až desítky tun viz. Obr. 1), přičemž se využívá váhy beranu bucharu (více než 25 tun) nebo síly hydraulického lisu, které se pro volné kování nejvíce používají. S ohledem na špatnou jakost povrchu volně a omezenou tvarovou složitost kovaného výkovku jsou tyto výkovky brány spíše pro prodej hutních polotovarů nebo pro speciální aplikace, např. lodní hřídele [1].



Obrázek 1 Překování litého ingotu [1]

Zápustkové kování znamená, že kování je realizováno v kovacích nástrojích (zápustkách) a postupnými rázy bucharu nebo pozvolným tlakem lisu vyplňuje výchozí polotovar dutinu, vyrobenou v těchto nástrojích a tímto se dosahuje konečných tvarů a rozměrů. V dnešní době představuje zápustkové kování nejrozšířenější technologii v kovárnách a výsledný výkovek lze v kovaném stavu použít pro aplikaci. S ohledem na požadované přesnosti výrobků je nutné uvažovat o minimálních přídavech na obrábění, a to pouze na funkčních plochách. Příklad zápustkového výkovku, který je kován na klikovém lise je uveden na Obr. 2. [1-3].



Obrázek 2 Příklad zápustkového více operačního kování [2]

Historicky byl pro zápustkové kování výhradně používán buchar. V současné době se ovšem vlivem mnoha konstrukčních nedostatků a nízké účinnosti od využití těchto kovacích strojů upouští. V minimálním počtu lze ještě pozorovat dílčí práce na třecích, parních, vzduchových nebo šabotových bucharech, ale rázy, které vznikají při kování na bucharech vyvolávají velké otřesy součástí vedení bucharu a v konečném důsledku uvolňují upevnění kovacích nástrojů a z tohoto důvodu nelze na bucharech kovat velmi přesné výkovky. Samotné otřesy, vznikající při kování na bucharech negativně ovlivňují přesnost okolních strojů, a dokonce také statiku budovy kovárny a v konečném důsledku negativně ovlivňují ergonomiku práce [4].

V porovnání s buchary, klikové lisy výše uvedené nedostatky nemají. Výchozím polotvarem (vsádkou) pro kování na klikových lisích je zpravidla tyčový polotvar, který je stříhán nebo řezán na požadovanou délku. Kování, v závislosti na složitosti tvaru, probíhá v několikadutinové zápustce, opatřené vodícími sloupky. V případě nutnosti je zápustky

opatřena vyrážecem. Okuje jsou pravidelně vyfoukávány z dutiny zápustky stlačeným vzduchem a tímto se zvyšuje jakost výkovku. Také z hlediska výrobních časů je lis vhodnější než buchar, protože je většinou zabudován v kovací lince, která je složena z pece pro ohřev (většinou indukční), vlastního kovacího agregátu (vhodný kovací lis) a klikového lisu pro ostřížení výronku nebo prostřížení blány předkovaného otvoru, přičemž všechny stroje jsou spojeny dopravníkem. Kovací linka může být vhodně doplněna o zařízení pro řízené ochlazování výkovku z dokovací teploty, které v omezené míře nahrazuje konvenční tepelné zpracování a přispívá k dosažení homogenní struktury výkovků [2-4].

1.1 Inovace prací v kovárnách

V návaznosti na aktuální směr vývoje prací ve strojírenství, také kovářenské průmyslové podniky musí neustále inovovat stávající zařízení a postupy, aby byly na trhu konkurenceschopné.

V závislosti na objemu a druhu výroby v kovárnách lze pozorovat implementaci nových technologií a postupů pro dosažení zvýšení produkce, resp. snížení výrobních a vedlejších časů. Mezi nejrozšířenější změny patří:

- **Nové druhy materiálů výkovků,**
- **Manipulace s materiálem,**
- **Předkovací operace,**
- **CAD/CAM systémy,**
- **Numerická simulace.**

Výše uvedené příklady jsou v dnešní době zastoupeny ve všech kovářenských výrobcích bez ohledu na objem a druh výroby. Např. v hromadné výrobě menších výkovků pro automobilový průmysl se uplatňují robotická pracoviště s transferovými linkami.

1.1.1 Nové druhy materiálů výkovků

Klasickým příkladem materiálu, který je použit na výkovek jsou nízko a středně-uhlíkové oceli, mikrolegované a nízko-legované oceli. V případě vysokolegovaných ocelí je problematickou fází ohřev (legury snižují tepelnou vodivost) na kovací teplotu a vlivem mikrostrukturních nehomogenit degradace vlastností. S rozvojem výsledků vývoje v oblasti ohřevu vysokolegovaných ocelí jsou již dnes známi platné postupy pro dosažení prohřátého polotovaru a snížení rizika praskání výkovků [5-7].

Speciálním případem materiálů výkovků jsou slitiny neželezných kovů. Každá z těchto slitin vyžaduje speciální přístup, který zajistí dokonalé prohřátí polotovaru, prokování, odstřižení výrobku, a především výsledné mechanické vlastnosti, především v souvislosti s tepelným zpracováním výkovků. V dnešní době se již běžně sekáme s výkovky slitin mědi, hliníku, niklu, titanu nebo hořčíku. Poměrně novou záležitostí jsou výkovky z hořčíkových slitin, především druhů AZ a WE, kdy s ohledem na krystalizaci hořčíku v hcp mřížce je nutné dodržet správné kovací, resp. dokovací teploty, a to zejména s ohledem na náchylnost daných slitin na praskání při nižších teplotách. Na Obr. 3 jsou uvedeny fotografie shodného druhu výkovku ze slitiny AZ61 při rozdílných kovacích teplotách 350°C (a) a 410°C (b). [7].



a)

b)

Obrázek 3 Příklad výkovku víka, vyrobeného z hořčíkové slitiny AZ61: a) kovací teplota 350°C; b) kovací teplota 410°C [7]

1.1.2 Manipulace s materiálem v kovárnách

Ve velké míře jsou ve strojírenství používány robotické manipulátory, které jsou vhodné pro velkosériovou nebo hromadnou výrobu, ale pro kovárny, kde se kovou malé série a tvarově odlišné výkovky nemá uplatnění robotizace své opodstatnění. Z důvodu hmotnosti je velkou výhodou použití univerzálních mechanických manipulátorů, které nevyžadují programování a jsou jednoduché na ovládání. Především dopravníkové pásy jsou využity pro transport ohřátého polotovaru ke kovacímu stroji nebo jsou využívány pro řízený režim ochlazování bez nebo s nuceným chlazením vzduchem (tzv. BY). Zejména při volném kování ingotů se uplatňují manipulační vozíky nebo kolejové (viz. Obr. 4) či bezkolejové

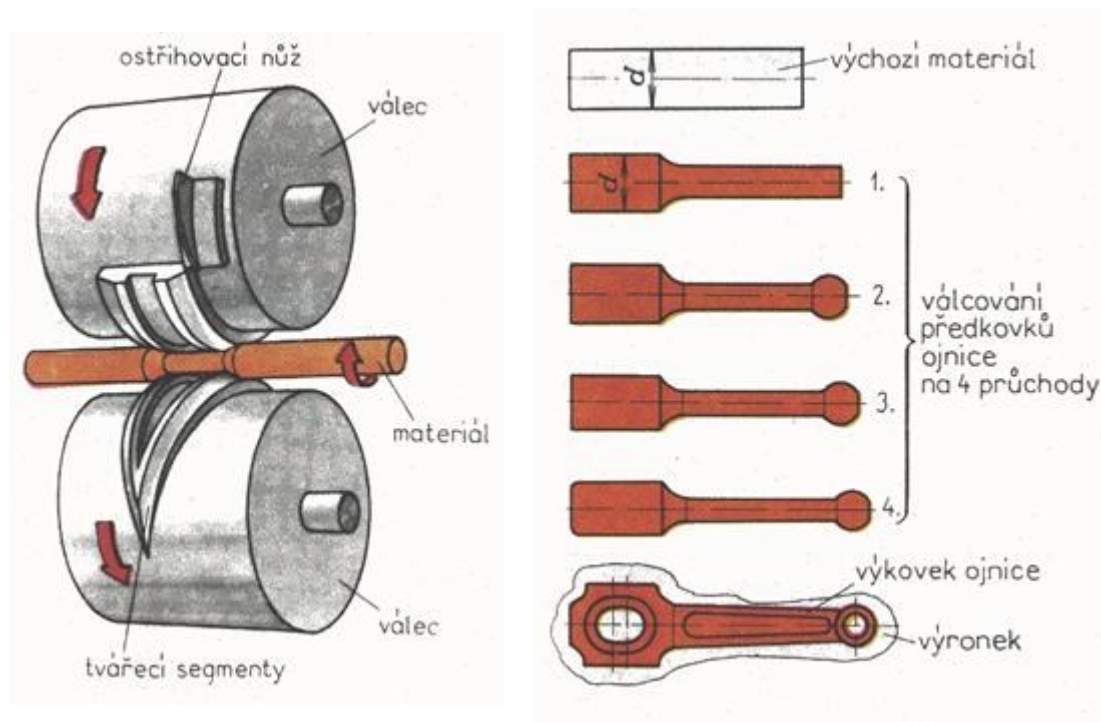
manipulátory pro obsluhu kovacího lisu nebo bucharu, aby bylo možné využít plnou kapacitu kovacího stroje.



Obrázek 4 Kolejový manipulátor série SSM od firmy Dango & Diententhal [8]

1.1.3 Předkovací operace v kovárnách

Kritickou fází v rámci celého procesu kování představuje správná volba tvaru předkovku, který musí zaručit správné rozložení objemu materiálu pro dokovací operaci. Cena výkovku je z cca. 75 % tvořena materiálem. Při vhodném návrhu a provedení předkovacích operací lze docílit snížení výrobních nákladů a tím zvýšit zisk kovárny. Ve speciálních případech se používá předkovacích operací na speciálních strojích. Nejrozšířenějším případem je tvar ojnice. Úkolem předkování je přemístění materiálu do oblastí oka/ok. Pro tyto účely se používá tzv. příčné klínové válcování (PKV). Jedná se o jednoúčelový stroj osazený speciálním nástrojem, který je konstruován na konkrétní tvar výkovku [4, 9]. Na obrázku 5 je uvedeno schematické znázornění PKV a technologický postup výkovku ojnice. Cenově dostupnou alternativu představují kovací válce, které se používají na prodlužovací, resp. zužovací operace.



Obrázek 5 Schematické znázornění technologie příčného klínového válcování (PKV) a příkladu využití PKV při kování ojnice [9]

1.1.4 CAD/CAM systémy v kovárnách

Podpůrný software představuje významnou pomoc při pracích v kovárnách. Využití při konstruktérských pracích nebo návrzích podmínek režimu třískového obrábění výkovků nebo kovacích nástrojů umožňuje velkou úsporu času i financí [10].

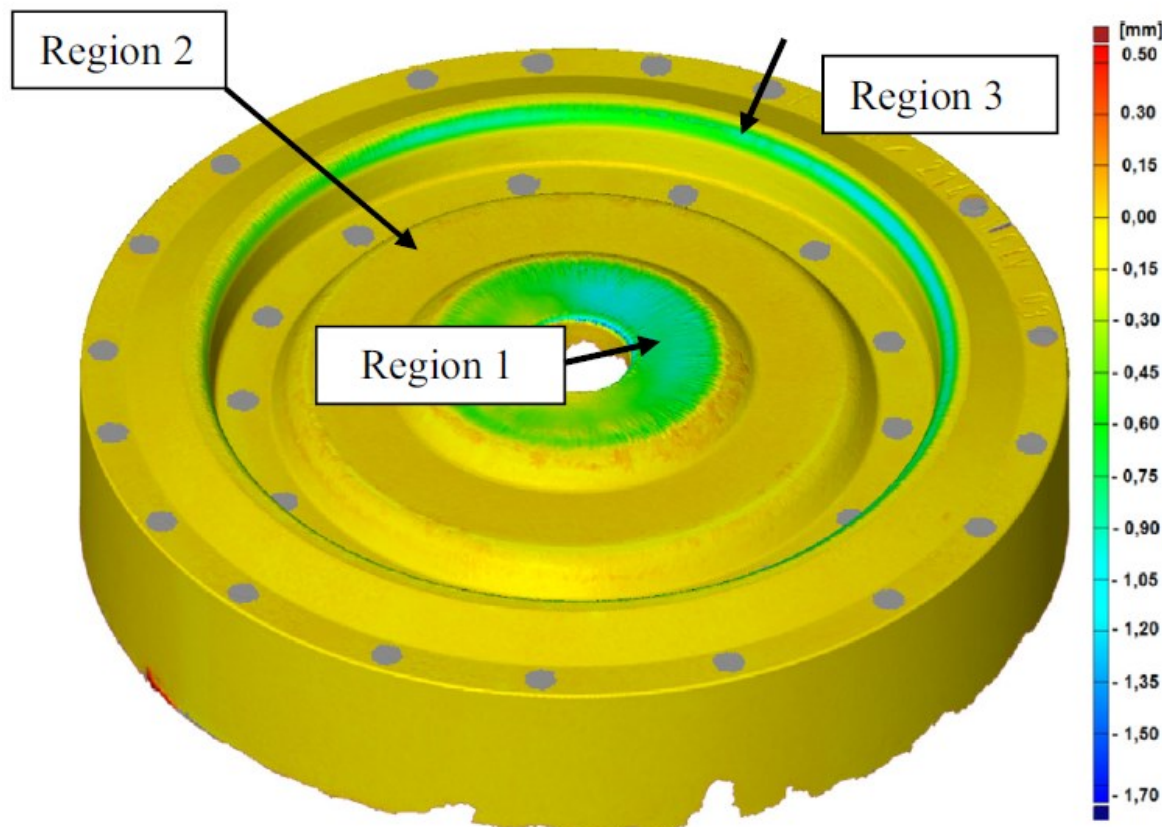
1.1.5 Numerická simulace kovacích operací

Podstatnou fází technické přípravy nové výroby v kovárnách je provedení simulace daného technologického postupu kování, jejichž výsledky umožňují verifikaci navrženého postupu kování s ohledem na zajištění dostatečné kovací síly stroje (rozložení operací) a také predikce případných vad výkovků (přeložky, otlučeniny, nedokování a přesazení), které souvisí se špatným konstrukčním řešením záпустek. S ohledem na cenu záпустkového zařízení (dle složitosti tvaru až 100 000 Kč na kus) je možnost predikovat chybu v konstrukci ještě před výrobou záпустky významným snížením výrobních nákladů.

Kromě výše uvedených simulací vlastního kovacího procesu lze v nových verzích většiny simulačních programů predikovat vývoj mikrostruktury daného materiálu při kování nebo následném tepelném zpracování, deformace tvaru výkovku při ostřížení výronku nebo prostřížení blány a z hlediska konstrukce a životnosti záпустek je důležitým modulem

simulace zatížení zápustek při kování, který odhaluje slabá konstrukční místa, která by v průběhu kování byla kritická z hlediska iniciace mechanického poškození (trhlin). Na základě empirických vzorců lze analyzovat také vliv, resp. tepelné namáhání zápustek, který je spolu s mechanickými činiteli zásadním faktorem ovlivňující životnost kovacích nástrojů [11-14].

Na Obr. 6 je uveden příklad výsledku simulace deformace spodní zápustky při kování rotační součásti (kola) z ušlechtilé oceli 20MnCr5 [11].



Obrázek 6 Výsledek simulace opotřebení spodní zápustky při kování kola z oceli 20MnCr5 po vykování 4300 ks [11]

2 Cíle práce

Cílem práce byl rozbor stávajícího stavu kování výkovku nástroje, určeného pro drcení tuhých odpadů. Rozbor byl proveden využitím numerické simulace v programu Simufact. Forming, který umožňuje nejen simulovat vlastní proces kování včetně režimů ochlazování, ale současně také lze predikovat průběh tepelného a mechanického zatížení kovacích nástrojů (zápustek).

Na základě dat, získaných simulací byly navrženy konstrukční úpravy zápustek a vhodnost těchto úprav byla verifikována simulací kování a zatížení zápustek.

V jednotlivých bodech byl postup provedení a vyhodnocení experimentálních prací následující:

- **Simulace stávajícího stavu kování zadaného dílce dle specifikace zákazníka a podniku.**
- **Na základě dat, získaných simulací kovacího procesu, byla provedena analýza zatížení zápustek v průběhu jednotlivých kovacích operací.**
- **Konzultace dosažených výsledků a návrh technologických a konstrukčních úprav.**
- **Provedení verifikace navržených konstrukčních úprav 2. operace simulací kovacího procesu.**
- **Simulace zatížení nově navržených geometrií zápustek v 2. a 3. operaci.**
- **Vyhodnocení vlivu navržených úprav na proces kování a zatížení zápustek.**
- **Návrh dalších změn.**

3 Rozbor aktuálního stavu kování zadaného výkovku

Výkovek, který je předmětem rozboru, uvedeném v této práci je vyroben z ušlechtilé ocel 16MnCr5 (chemické složení je uvedeno v Tab. 1) a slouží jako nástroj pro drcení tuhých odpadů.

Tabulka 1 Chemické složení oceli 16 MnCr5 (hodnoty jsou uvedeny v hm. %) [15]

	C	Mn	Si	Cr	P max.	S max.
16MnCr5	0,14-0,19	1,10-1,40	0,17-0,37	0,80-1,10	0,035	0,035



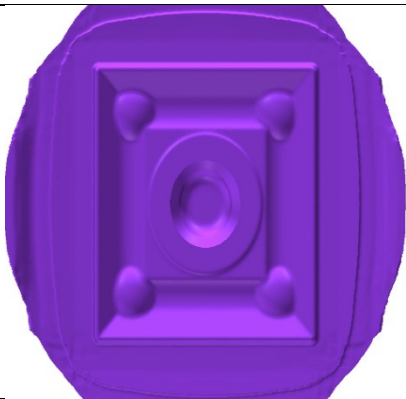
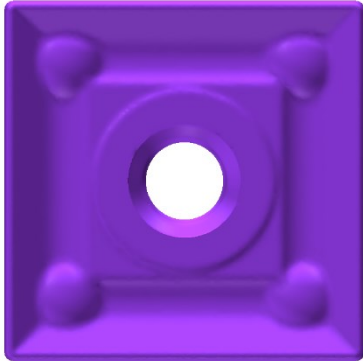
Stanovení dovolených mezních úchylek a tolerancí výkovku bylo provedeno v souladu s platnou normou EN 10243-1. Ukazatel členitosti tvaru byl stanoven S1. Stupeň obtížnosti kování je na základě chemického složení materiálu výkovku M2. Dle specifikace zákazníka je stupeň přesnosti F, tedy obvyklé provedení [16]. Na výkrese výkovku, který je uveden jako samostatná příloha A, jsou uvedeny všechny informace o výkovku dané součásti.

Technologický postup výroby výkovku je uveden v Tab. 2. Sled operací spočívá v stříhání polotovaru o rozměrech 70 mm x 70 mm na délku 120 mm na strojních nůžkách PELS 500. Polotovar je stříhán ve stavu ohřátém na min. 200°C.

Kování je realizováno na kovací lince LZK 2500, která je složena s indukčním ohřevem (polotovar je ohříván na teplotu min. 1200°C-dle interních postupů). Kování je víceoperační, konkrétně je prováděno ve 3. operacích (pěchování, předlisování a dolisování). Po vykování je ostřížen výronek a prostřížena blána předkovaného otvoru.

Dle požadavků zákazníka je výkovek dodán ve stavu normalizačně žíhaném. Normalizační žíhání je prováděno ve vozové peci při teplotě austenitizace 880°C s výdrží 3 hodiny a následné pozvolné ochlazování na vzduchu. Po tepelném zpracování následuje tryskání a finální kontrola výkovku ve standardním režimu.

Tabulka 2 Sled technologických operací na úseku technologie kovárny

Operace	Podmínky	Poznámka
1) Dělení materiálu	ScKu 500.1: PELS 500	Polotovár (70x70) nahřát na teplotu 200-300 °C a stříhat na délku 120 mm. Kontrolovat hmotnost 4,5 kg (+0,2; -0,1 kg) v rozsahu min. 1 ks z každé tyče.
2) Indukční ohřev	SOP 630/1,5 – A30	Nastavení teploty třídičky: Dolní teplota: 1130 °C Horní teplota: 1230 °C
3) Kování	LZK 2500	Počet kovacíh operací: 3
1. operace	2. operace	3. operace
Pěchovat mezi rovnými kovádky na výšku $v = 40$ mm.	Předlisovat	Lisovat na hotovo
		
4) Ostříh	LDO 500 A	Ostříhnout výronek a prostříhnout blánu
		
5) Kontrola	Interval 30 minut	Kontrolovat tvar a rozměry dle platné výkresové dokumentace
6) Tepelné zpracování	Vozová pec ZEZ Praha RDO 10.20	Normalizačně žítat dle programu č. 4.
7) Tryskání	Bubnový tryškač PTB 3	-
8) Výstupní kontrola	-	Kontrolovat tvar a rozměry
9) Balení	Balíč ruční	Balit dle platného předpisu

3.1 Simulace procesu kování – původní varianta

Podstatnou fází technické přípravy výroby je provedení simulace procesu kování s využitím simulačních programů. Z hlediska prací v kovárnách lze prostřednictvím výstupů ze simulace ušetřit velké množství financí a představuje poslední možnost konstrukční nebo technologické úpravy daného procesu před zahájením kovacích zkoušek.

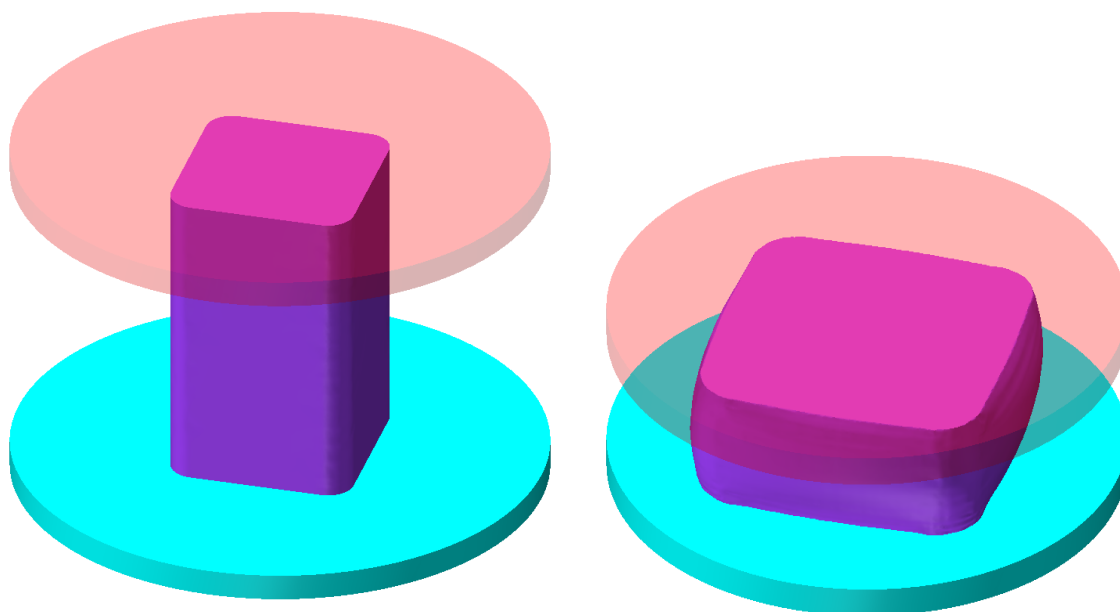
Simulace procesu kování daného výkovku byla provedena v simulačním programu Simufact.Forming, který je v praxi často využíván. Nastavení podmínek simulace bylo provedeno na základě dat, uložených v použitém simulačním programu a podkladů, poskytnutých firmou UNEX, a.s. Výpočet byl proveden metodou konečných objemů (FV- Finite Volume) a to z důvodu snížení procesních časů výpočtů v jednotlivých kovacích operacích. Parametry, použité pro simulaci, jsou uvedeny v Tab. 3.

Tabulka 3 Základní data nastavená v simulaci

Označení	Podmínky	Zdroj
Materiál výkovku	16MnCr5	[knihovna S.Form.]
Stroj	Mechanický lis LZK 2500	[UNEX, a.s.]
Tření	Coulomb ($\mu=0,3$)	[UNEX, a.s.]
Teplota výkovku	1180°C	[UNEX, a.s.]
Teplota zápuštěk	200°C	[UNEX, a.s.]
Součinitel přestupu tepla	50 W.m ⁻² .K ⁻¹	[knihovna S.Form.]
Teplotní roztažnost mat. výkovku	1,5 %	[UNEX, a.s.]

Dle návrhu je kování provedeno na 3 operace. První operací je pēchování polotovaru s výchozími rozměry 70 x 70 mm (R 20) a délky 120 mm. Polotovar byl navržen dle zákona o zachování objemu a dle návrhu tvaru a rozměrů výkovku činní hmotnost včetně přídavků na blánu a výronek 4,5 kg.

Z hlediska zlepšení vyplnění dutiny zápuštěk v 2. operaci je důležité v 1. operaci napēchovat polotovar na šířku 115 mm. Této šířce odpovídá (dle zákona o zachování objemu) výška pēchovaného polotovaru 40 mm. Pro tyto účely je polotovar pēchován na výšku 40 mm mezi rovnými kovádky, jak je uvedeno na Obr. 7.

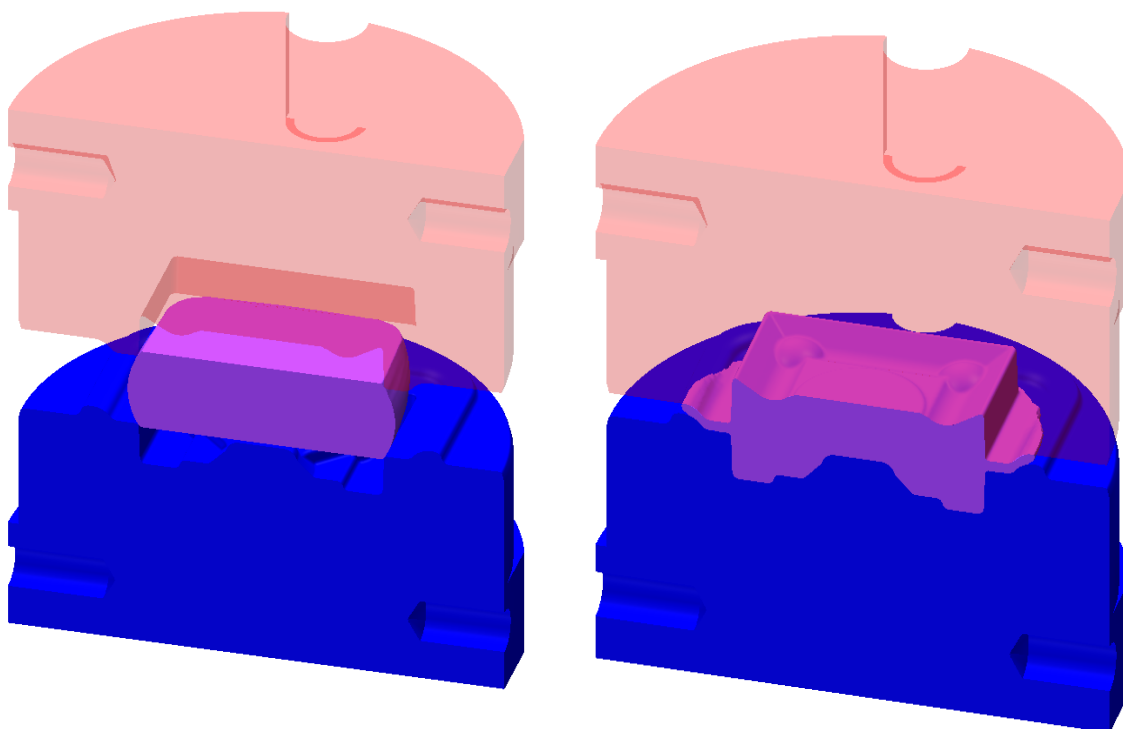


a)

b)

Obrázek 7 Proces přechování: sestava: a) před přechovacím procesem; b) po přechovacím procesu

Ve druhé operaci je napěchovaný polotovár předlisován do tvaru konečného výkovku se zaměřením na předkování tvarových ploch konečného výkovku. V předlisovací operaci dochází k předkování na tvar a rozměry shodné s finálním výkovkem s tím rozdílem, že je pouze ze spodní strany výkovku předkován otvor, který bude dokován v poslední operaci (Obr. 8 a)-b)).



a)

b)

Obrázek 8 Proces předlisování: a) před procesem předlisování; b) po procesu předlisování

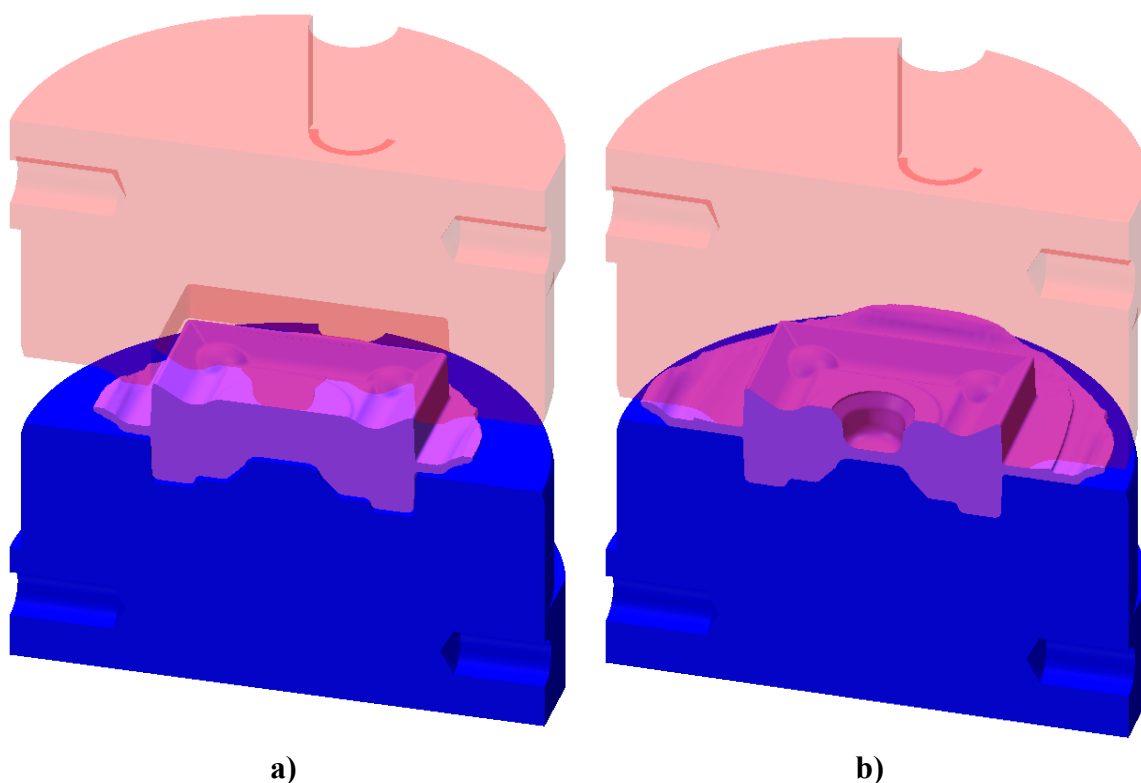
V 2. operaci je důležité dosáhnout plného zaplnění dutiny zápustek. S ohledem na navrženou geometrii dutiny bylo při konstrukčním řešení kovacíh nástrojů důležité, aby nebyl materiál vytlačován do výronkové drážky a nevznikal tak nedokovaný výkovek. Z tohoto důvodu byly nástroje navrženy s brzdícími žebry, které sníží rychlost vytlačování kovu do oblasti můstku výronkové drážky, jak je uvedeno na Obr. 9.



Obrázek 9 3D model geometrie spodní zápustky pro 2. operaci (předlisování)

Finální operací je dokování, resp. kalibrace tvaru a rozměrů výkovku na konečné hodnoty a dokování otvoru, částečně předkovaného v 2. operaci. V porovnání s předchozí operací je větší množství materiálu vytlačeno do výronkové drážky, a to z důvodu dokování otvoru, což se promítne do zrychlení vytlačování přebytečného materiálu do výronkové drážky (Obr. 10).

Z výsledků provedené simulace procesu kování je zřejmé, že dle výše uvedeného technologického postupu lze produkovat výkovek s rozměry dle specifikace ve výkresové dokumentaci. Z hlediska technologičnosti lze daný postup upravit, aby bylo dosaženo nižší spotřeby materiálu. Vhodnou alternativou by mohlo být snížení vsádkové hmotnosti, ale s ohledem na kritickou fázi zaplnění rohových částí dutiny zápustek v 2. operaci by současně musela být upravena konstrukce kovacíh nástrojů.



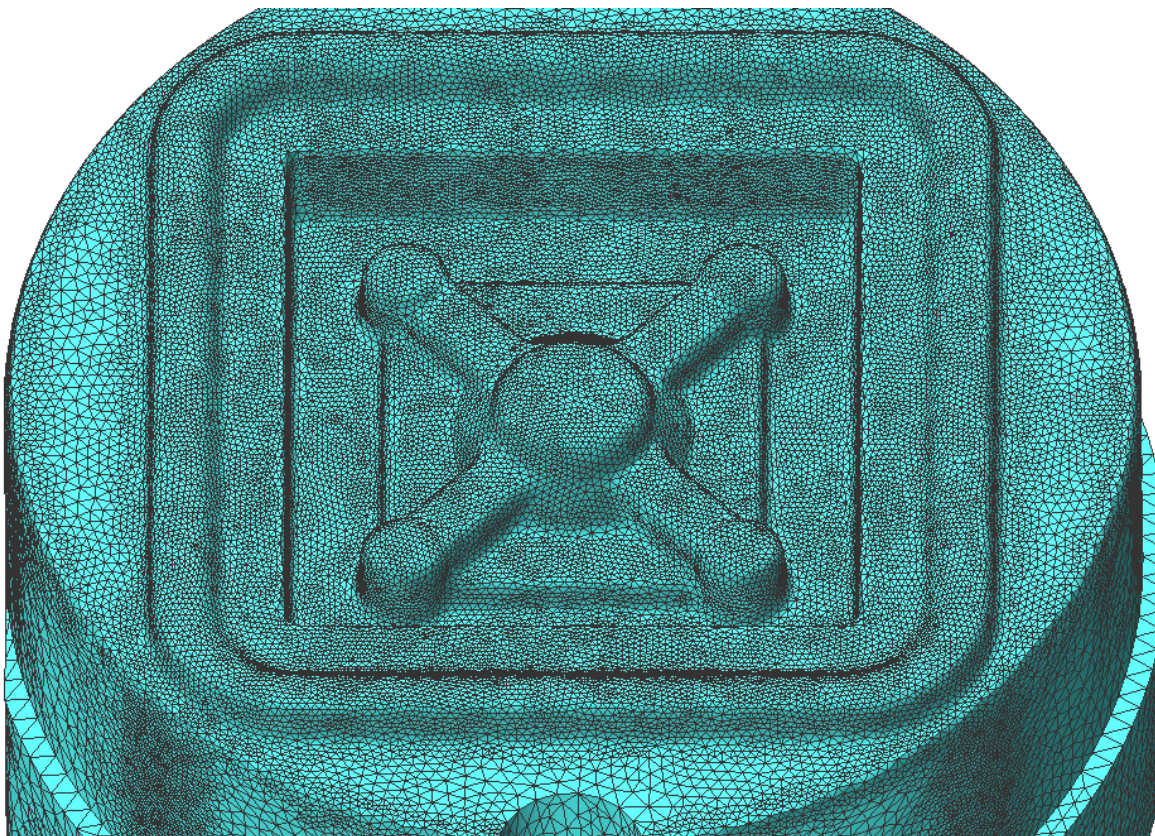
Obrázek 10 Proces dolisování: a) před procesem dolisování; b) po procesu dolisování

3.2 Simulace zatížení zápustek – původní varianta

Dalším úkolem při návrhu výkovku a sledu technologických operací v kovárně byla predikce namáhání horní a spodní zápustky ve 2. a 3. operaci. Je důležité provést analýzu namáhání zápustek, protože lze zjistit kritická místa konstrukce dutiny zápustek a tím eliminovat vznik trhlin, které by mohly narušit zápustku a znehodnotit jakost výkovku.

Při využití modulu zatížení zápustek (Die Load) v prostředí simulačního programu Simufact.Forming analýza vychází z deformačně-napěťových hodnot, kterých bylo dosaženo v simulaci kování. Je tedy důležité, aby předchozí simulace kování byla správně nastavena, tedy aby všechny okrajové podmínky byly odpovídající a bylo provedeno správné napolohování předkovku v dutině zápustky.

S ohledem na tvarovou složitost dutiny zápustek a předpoklad, že z hlediska napětí bude kritickým místem zaoblení hran, bylo navrženo, že analyzovaná zápustka bude zasít'ovaná elementem o velikosti 5 mm při současném zmenšení elementu ve tvaru dutiny zápustky na poloviční hodnotu, tedy 2,5 mm. Příklad navrženého zasít'ování spodní zápustky v 2. operaci (předlisování) je uveden v Obr. 11.



Obrázek 11 Příklad zasítování spodní zápustky v 2. operaci (předlisování) se zvýšením hustoty elementů ve tvarové oblasti (408274 elementů)

Pro simulaci zatížení zápustek při kování byla jako materiál vybrána nástrojová ocel 55NiCrMoV6, která představuje ekvivalent nástrojové oceli 19 663. Pro zajištění odpovídajících vlastností zápustky při kovací procesy je daná ocel zakalena z kalící teploty 850°C do oleje. S ohledem na požadavek vyšší houževnatosti je daná ocel po zakalení 2krát popuštěna ve vakuové peci. Mechanické vlastnosti dané oceli po tepelném zpracování jsou uvedeny v Tab. 4.

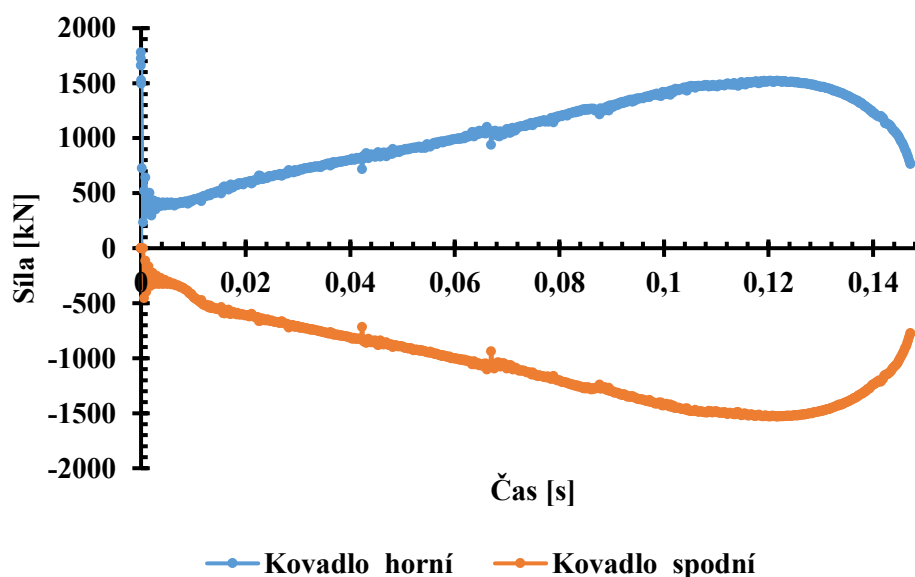
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti nástrojové oceli 55NiCrMoV6 (při laboratorní teplotě)

Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Zúžení [%]	Tvrdość HRC	Vrubová houževnatost [kJ.m ⁻²]
1400-1450	1150-1180	max. 7	12-24	44-50	17-28

Výsledky simulace zatížení jsou prezentovány v podmínce nejvyšší kovací síly. Lze předpokládat, že nejvyšší napětí, iniciované v zápustce bude při nejvyšší kovací síle, a tudíž

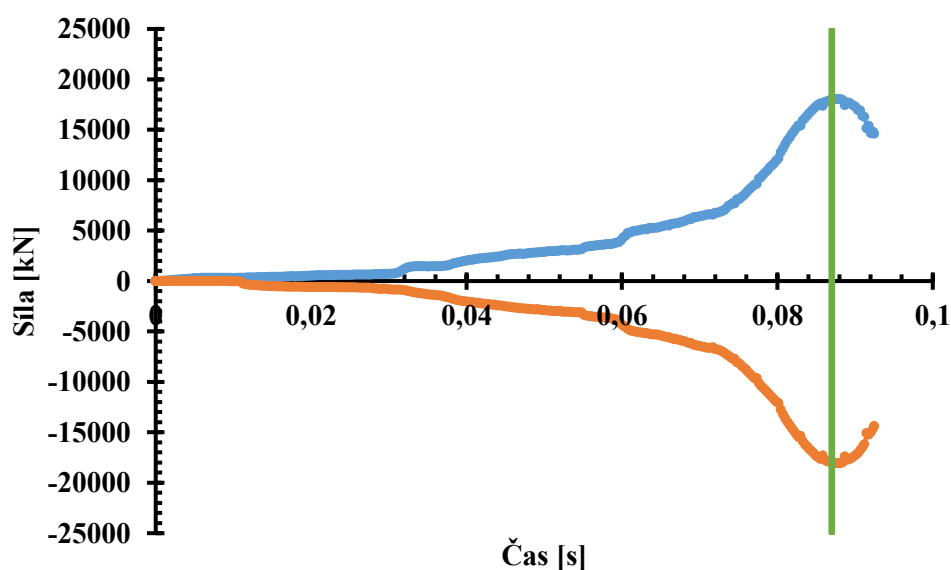
bude tato podmínky kritická pro stanovení vhodnosti technologického, potažmo konstrukčního řešení.

Průběh kovací síly při pěchování vsádky je uveden na obrázku č. 12. Z hlediska řešení namáhání kovacích nástrojů je analýza rovných kovadel pro pěchování nepodstatná, jelikož nevznikají významné síly, které by překročily mez kluzu a vyvolali by plastickou deformaci v kovadle.



Obrázek 12 Průběh kovacích sil při procesu pěchování

Průběh kovací síly v 2. operaci (předlisování) je uveden na Obr. 13. Výpočtem sil při kování daného dílu bylo zjištěno, že v horní zápustce vzniká maximální síla 18039,084 N a ve spodní zápustce vzniká síla 18162,1 N. Je zřejmé, že silově je spodní zápustka více namáhána než spodní.

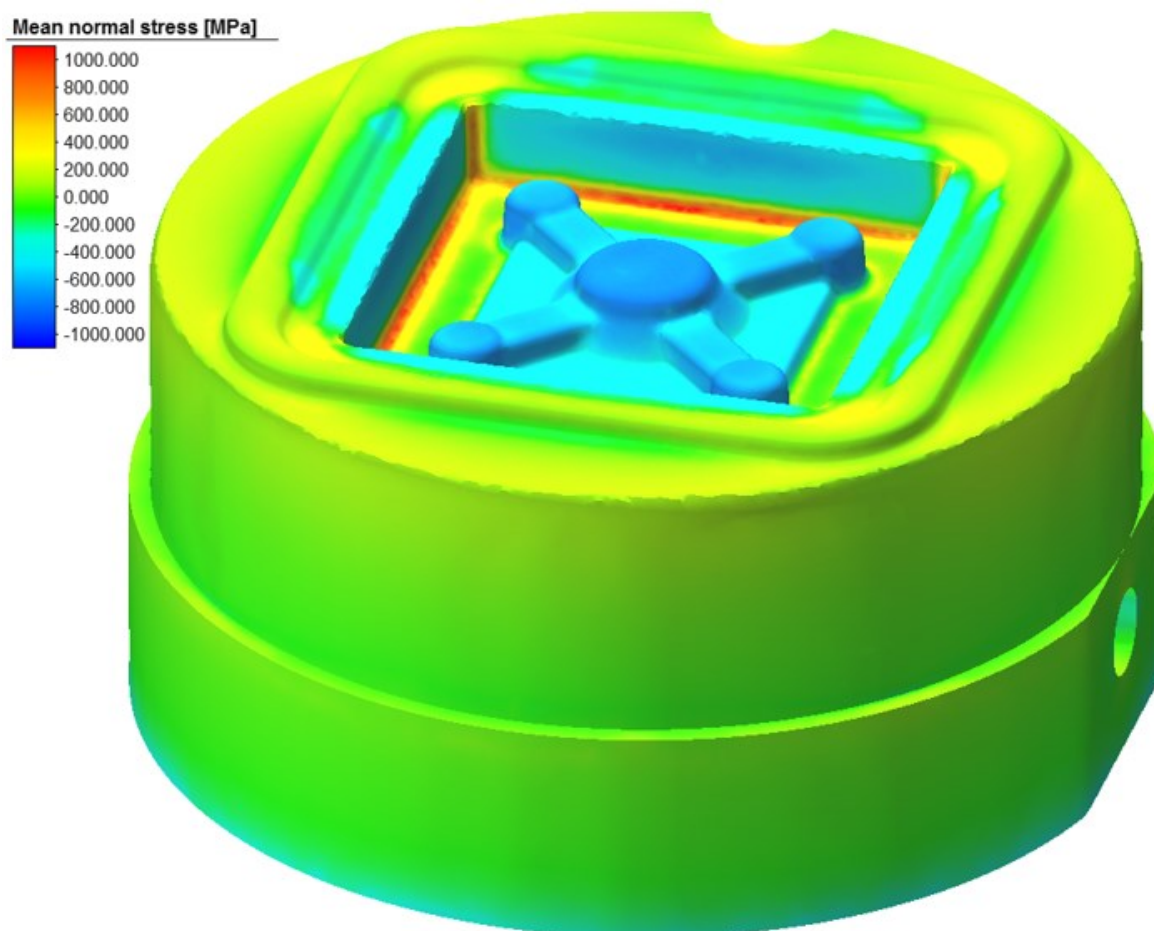


Obrázek 13 Průběh kovacích sil při procesu předlisování

Z výsledků analýzy zatížení spodní zápustky v 2. operaci normálovým napětím (Obr. 14) je zřejmé, že z pohledu velikosti napětí je kritickým místem zaoblení, které je R3. Dále je stlačován trn pro předkování průchozího tvoru.

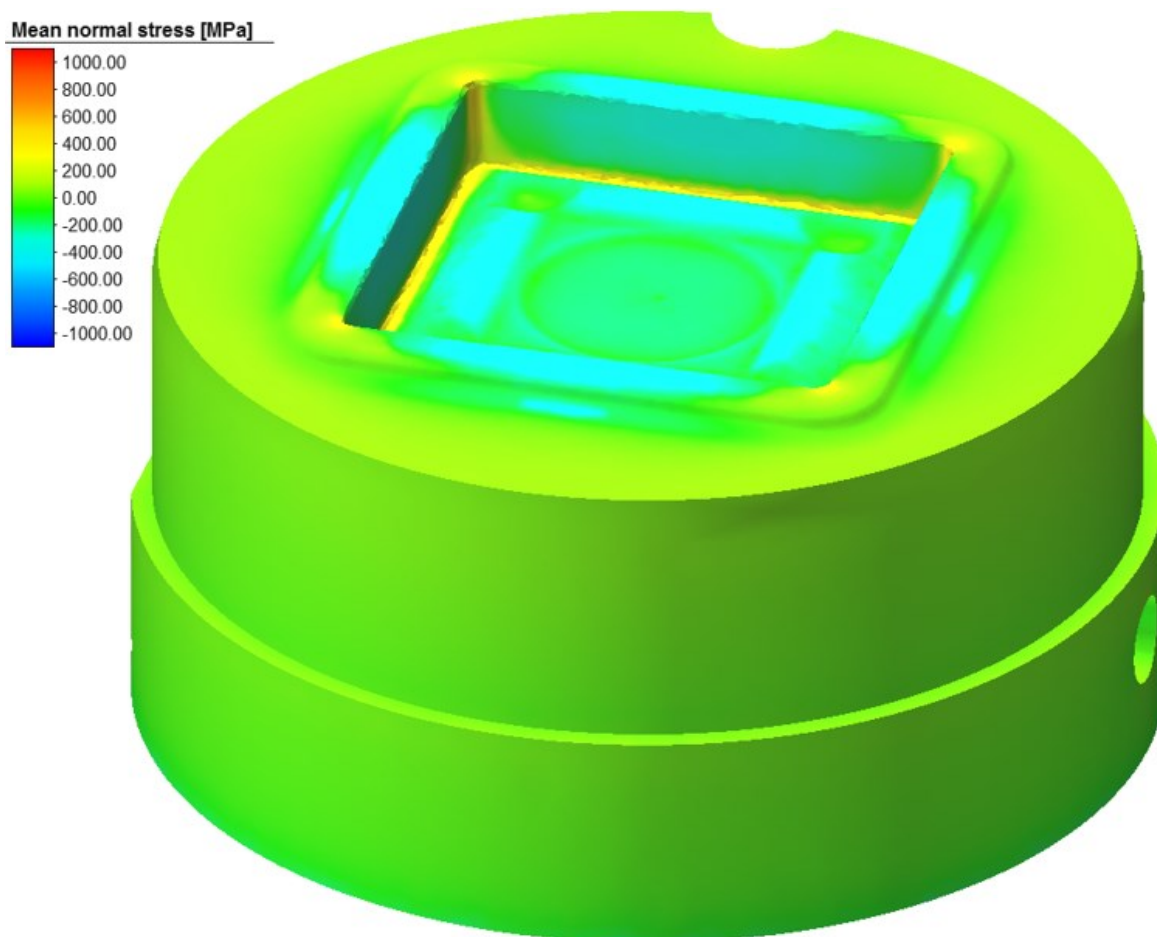
V oblasti přechodových zaoblení se hodnota normálového napětí pohybovala v rozmezí 600-1100 MPa, což představuje vysokou hodnotu napětí, které se podílí na snížení životnosti zápustky. Vysoké hodnoty napětí zde vznikají v důsledku vytlačování materiálu do této oblasti v poslední fázi zaplnění, a tedy kov je ochlazený a tím se zvyšuje přetvárný odpor. Takový materiál je obtížné vytlačit do prostoru s malým poloměrem zaoblení.

Ve snaze předkovat otvor je navržený tvar trnu zatlačován napětím cca. 800 MPa. Tato hodnota nepředstavuje významné ovlivnění životnosti zápustky s ohledem na napětí, ale může se podílet na snížení přesnosti předkování otvoru v závislosti na počtu vykovaných kusů výkovku.



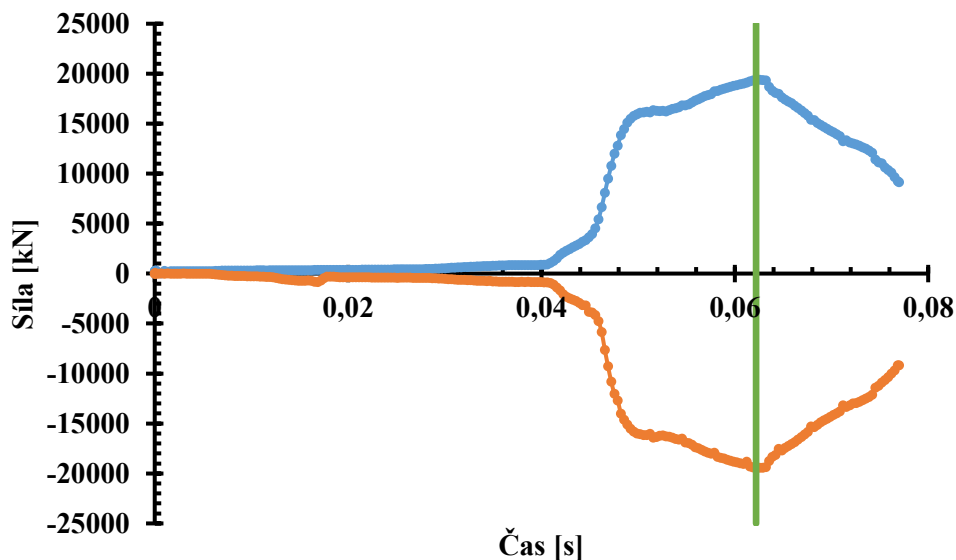
Obrázek 14 Průběh normálového napětí ve spodní zápustce 2. operace

Analýzou napětí, vznikajícím v horní zápustce 2. operace bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty napětí jsou koncentrovány v oblasti zaoblení s hodnotami od 200 do 550 MPa. Na Obr. 15 je patrné rozložení napětí v horní zápustce při maximální kovací síle.



Obrázek 15 Průběh normálového napětí v horní zápustce 2. operace

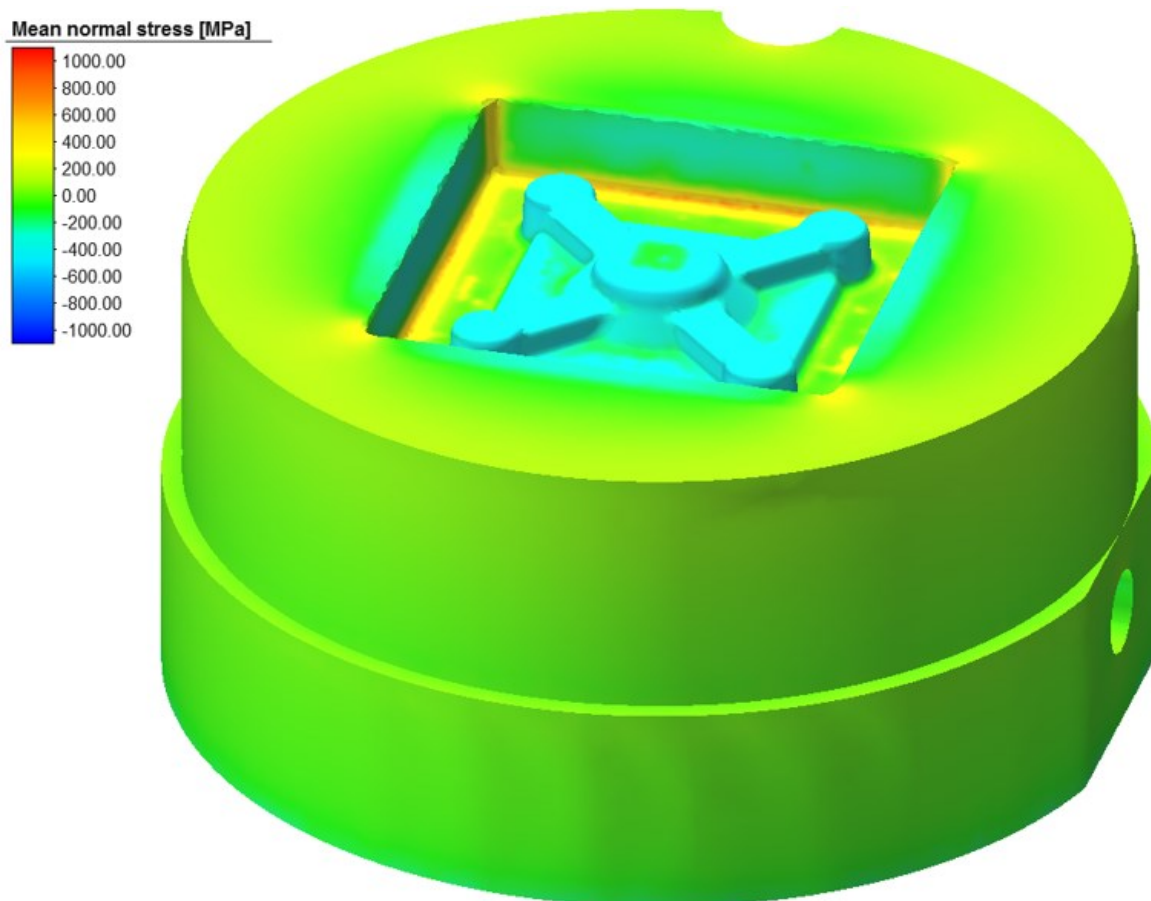
Ve 3. operaci dochází ke zvýšení kovací síly, kde byla dosažena maximální hodnota 19500 N (Obr. 16). V rámci pokrytí kovací síly zvoleným lisem LZK 2500 (25 MN) se pohybujeme na 78 % kapacity.



Obrázek 16 Průběh kovacích sil při procesu dolisování

Při dolisování výkovku (3. operace) dochází k obdobnému charakteru namáhání jako v případě 2. operace. Z výsledků, publikovaných na obrázku 17 je zřetelné, že vyšší hodnoty napětí jsou v oblasti přechodových zaoblení, ovšem s napětím, které se pohybuje v rozmezí hodnot 450-720 MPa.

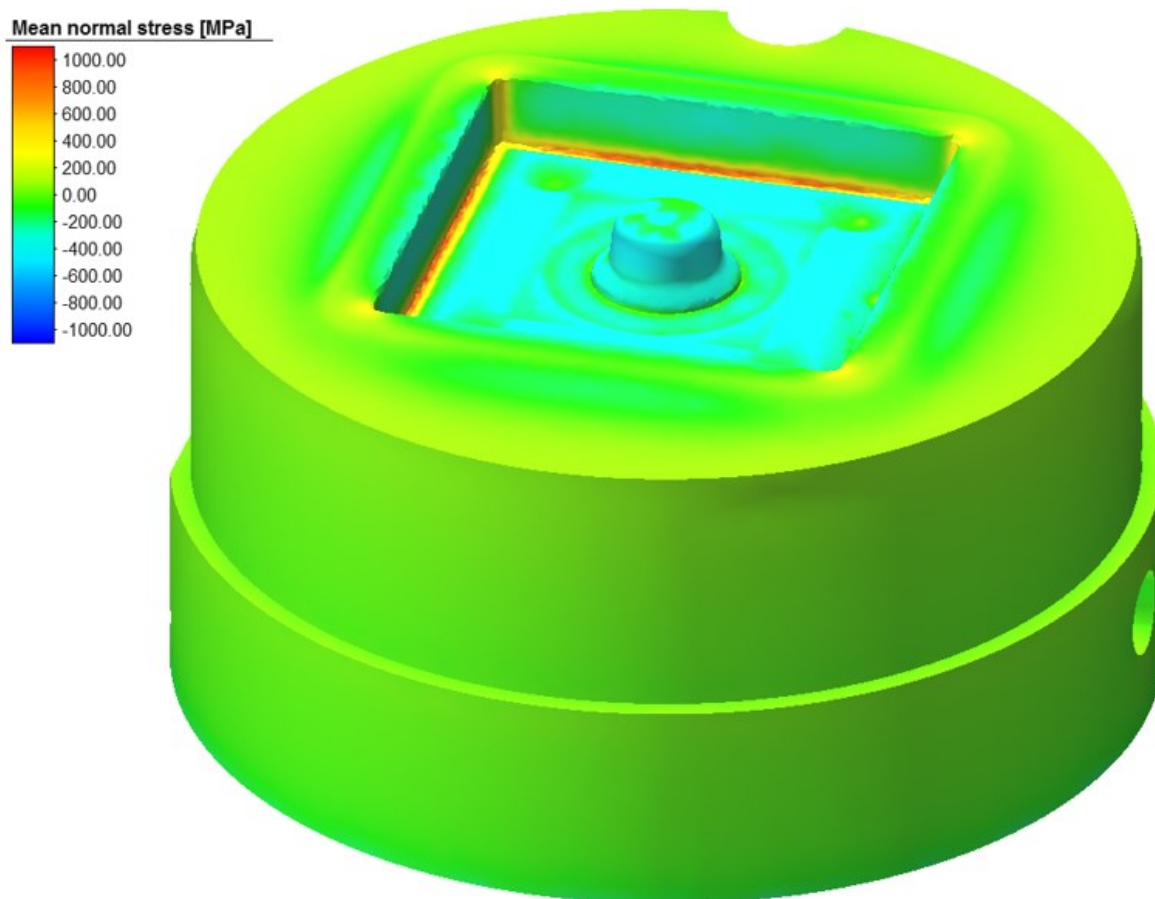
V porovnání s předchozí operací je hodnota napětí v oblasti trnu o cca 50% nižší. Maximální hodnota napětí byla stanovena 350 MPa.



Obrázek 17 Průběh normálového napětí ve spodní zápustce 3. operace

Výsledek analýzy napětí horní zápustky v dolisovací operaci (Obr. 18) ukazuje, že významně stoupla hodnota napětí v oblasti zaoblení, kde bylo dosaženo napětí v maximu 950-1000 MPa (pouze lokálně). Zvýšení napětí bylo způsobeno charakterem operace. V této operaci dochází k dokování otvoru, který ovšem byl předkován pouze ze spodní strany výkovku a v poslední operaci je protlačován trnem, umístěným v horní zápustce také z vrchní strany. Tlak trnu způsobuje zvýšení tlaku na materiál, který je předává stěnám dutiny zápustky a také zaoblení, které vzhledem k malému poloměru zaoblení působí jako kritické místo.

Trn pro předkování otvoru je namáhám pouze minimálně (napětí cca. 350 MPa).



Obrázek 18 Průběh normálového napětí v horní zápustce 3. operace

4 Návrh konstrukčních úprav

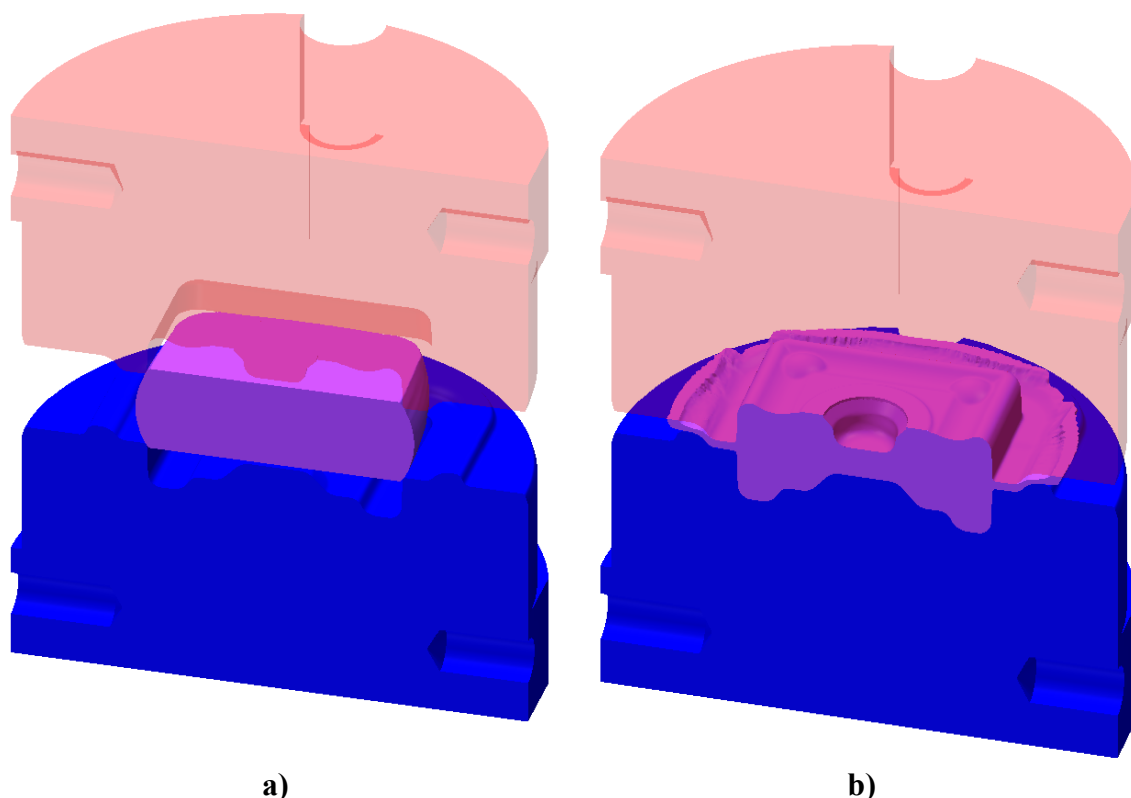
Na základě výsledků, dosažených simulací procesu kování a zatížení zápustek, byly navrženy změny v konstrukci zápustek ve 2. operaci (předlisování). Pro snížení rizika nedokování rohových částí výkovku je ve 2. operaci dutina zvětšen poloměr zaoblení hrany na R10. Tvarové plochy na horní a spodní ploše výkovku jsou v předkovací operaci naznačeny a nově budou dokovány ve finální operaci.

Nastavení simulace bylo provedeno v souladu se starou variantou provedení.

4.1 Simulace procesu kování – nové provedení

1. operace, tedy pēchování, je shodná s předchozí verzí postupu kování. Tedy pēchování polotovaru 70x70 s délkou 115 mm na výšku 40 mm.

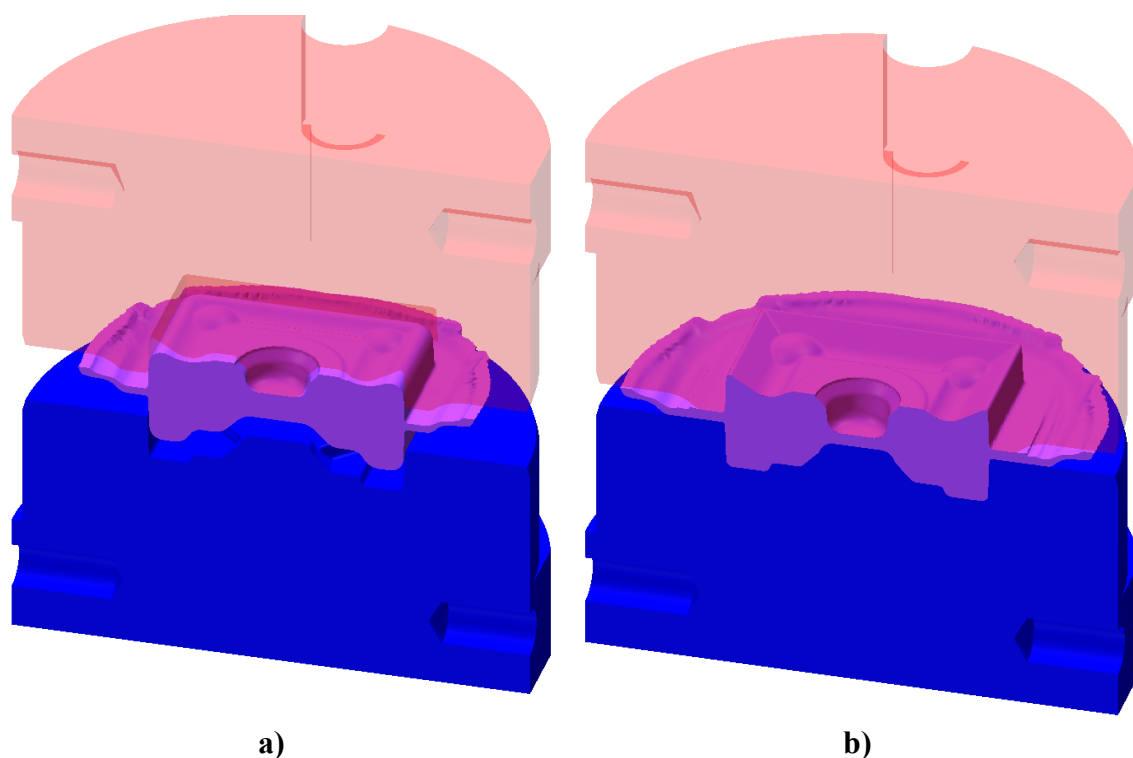
Největší změny byly provedeny na konstrukčním řešení zápustek v 2. operaci, které jsou patrné ze snímků výsledků simulace, uvedených na Obr. 19 a)-b). V porovnání s původní variantou bylo navrženo předkování otvoru s tloušťkou blány 13 mm. Při protlačování otvoru bude docházet ke zlepšení zabíhání materiálu výkovku do okrajových částí dutiny, které byly nově upraveny zvětšením poloměru zaoblení hran na poloměr R10. V takovém případě s snížilo riziko nedokování výkovku v předlisovací operaci.



a) b)
Obrázek 19 Proces předlisování v novém konstrukčním provedení: a) před procesem předlisování; b) po procesu předlisování

Porovnání geometrií výkovků po 2. operaci (původní i nové provedení) je uvedeno samostatně, jako Příloha B. Z uvedeného je zřejmý rozdíl mezi geometriemi výkovku v 2. operaci v závislosti na geometrii zápustek. Provedená úprava byla provedena s ohledem na silové namáhání kovacích nástrojů, které byly uvedeny v předchozí kapitole.

Na Obr. 20 je uvedeno porovnání vývoje geometrie výkovku před dokováním (Obr. 20 a)) a po provedení dokovací operace (Obr. 20 b)). V průběhu 3. operace (dokování) je dle nového konceptu řešení geometrie zápustek je dokován otvor na výšku blány 5,5 mm a celý výkovek je dokován na finální tvar dle předepsané výkresové dokumentace.



a) **b)**
Obrázek 20 Proces dolisování v novém konstrukčním provedení: a) před procesem dolisování; b) po procesu dolisování

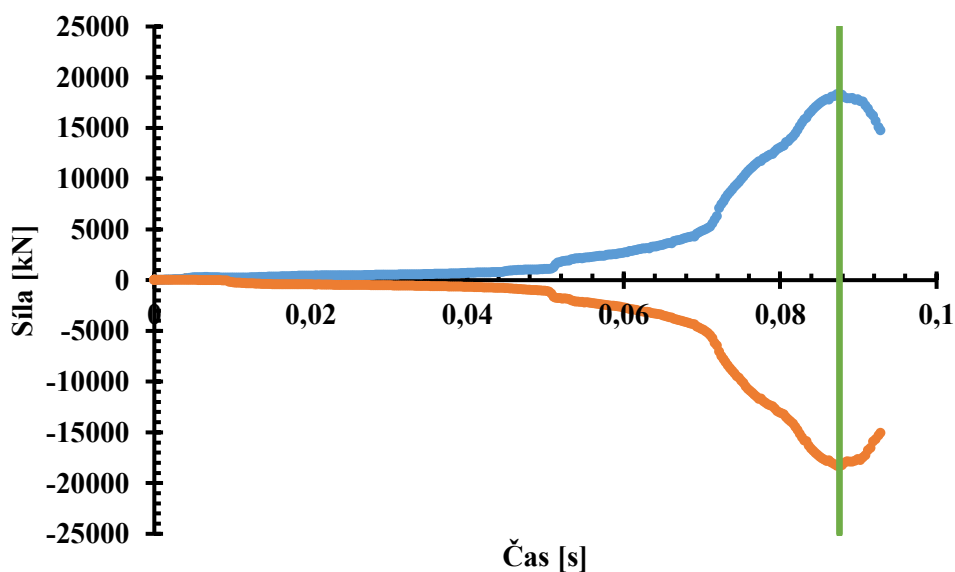
Z výsledků simulace je patrné, že k vykování na požadovaný tvar a rozměry dochází až v poslední operaci, což by se mělo příznivě projevit na kovacích silách a zatížení zápustek, především v 2. operaci, která je z hlediska namáhání (životnosti zápustek) kritická. Další výhodou, která plyne z nového řešení, je možnost snížení vsádkové hmotnosti. Optimalizace hmotnosti vsádky bude předmětem dalšího výzkumu v dané oblasti.

4.2 Simulace zatížení zápustek – nové provedení

Na základě porovnání výsledků simulace kování původního a nového provedení lze předpokládat vliv konstrukčních změn na průběh napětí ve 2. a 3. operaci.

Postup provedení analýzy zatížení nového konstrukčního provedení zápustek byl totožný s postupem analýzy původního konceptu.

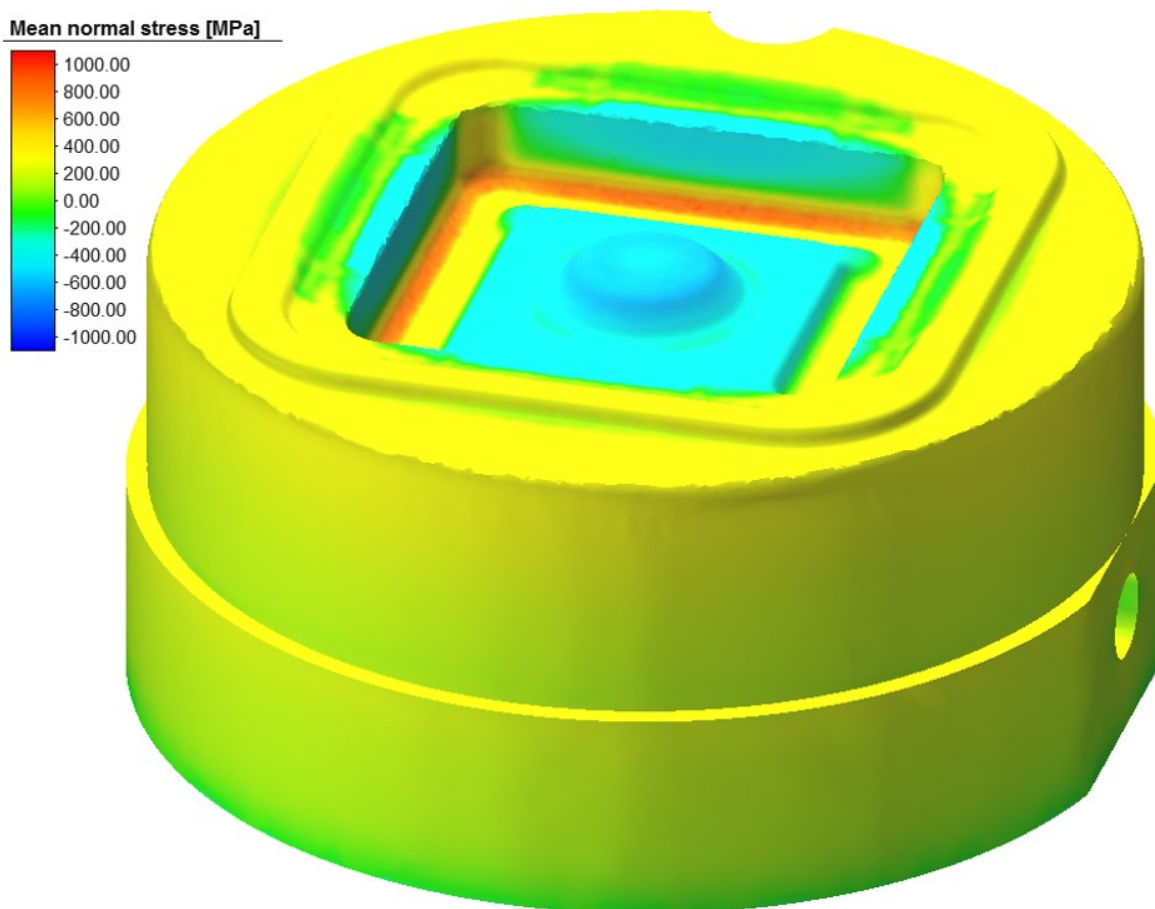
Na Obr. 21 jsou uvedeny průběhy kovací síly v závislosti na čase kování dle simulace. Simulací bylo zjištěno, že maximální kovací síla dosahuje hodnoty 18336,4 N (spodní zápustka). V porovnání s původní variantou řešení, kdy síla dosahovala max. 18162 N, dochází k mírnému zvýšení kovací síly. Rozdíl kovacích sil mezi jednotlivými variantami geometrií zápustek je minimální a pro praktické využití nemá vliv. S ohledem na navrženou změnu geometrie dochází k rychlejšímu vyplnění dutiny zápustky a vytlačování přebytečného kovu do výronkové drážky kde dochází k brzdění a zvýšení odporu materiálu, který se projeví ve zvýšení výsledné hodnoty kovací síly.



Obrázek 21 Průběh kovacích sil při procesu předlisování (nové provedení)

Analýzou namáhání spodní zápustky ve 2. operaci (předlisování) bylo zjištěno, že z hlediska maximálních hodnot napětí zůstávají kritickými místy oblast zaoblení a trnu pro předkování otvoru (Obr. 22). Maximální hodnota normálového napětí v oblasti zaoblení hran dosahovala hodnot v rozmezí 560 až 750 MPa.

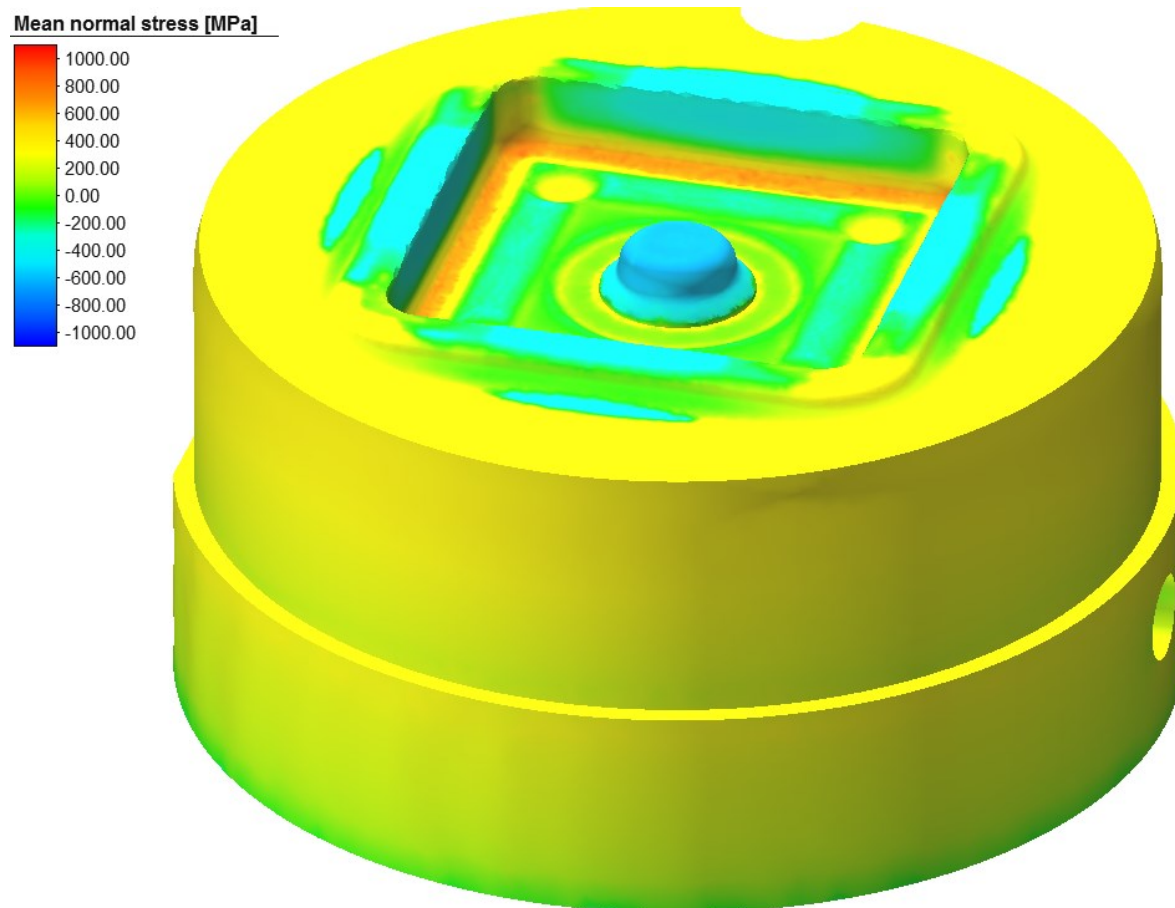
V oblasti předkování průchozího otvoru kovaného dílce bylo zjištěno napětí v napětí cca. 570 MPa (na povrchu trnu) a jeho tendence byla ve směru tloušťky klesající k hodnotě 262 MPa ve vzdálenosti cca. 18 mm od povrchu trnu.



Obrázek 22 Průběh normálového napětí ve spodní zápustce 2. operace (nové provedení)

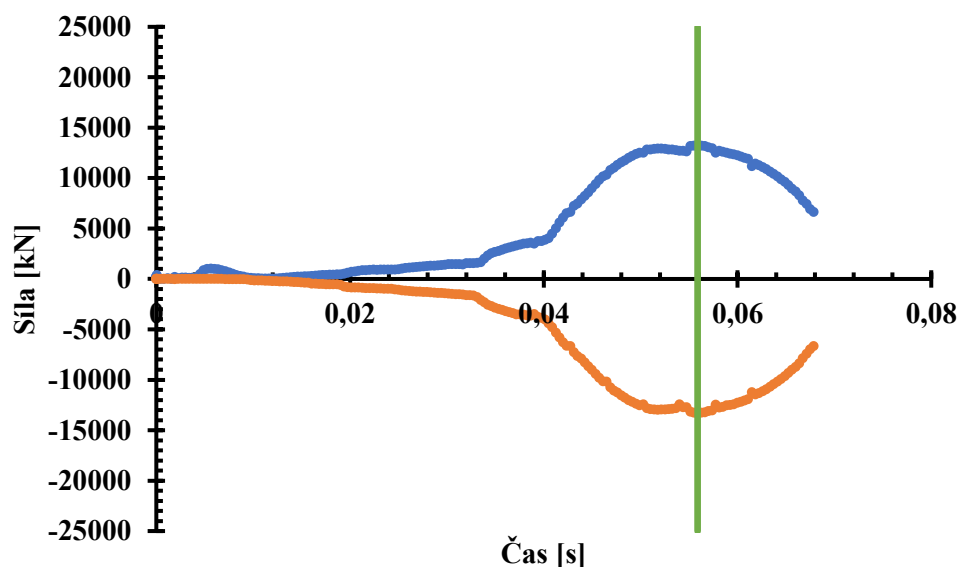
Obrázek 23 zobrazuje rozložení napětí při dosažení maximální kovací síly v horní zápustce 2. operace. Z uvedeného rozložení normálového napětí je zřejmé, že dutina zápustky je zatěžována méně než v případě spodní zápustky. Mírně vyšší hodnoty napětí v oblasti zaoblení, kde je kov vytlačován, byly v rozsahu 450-572 MPa. V oblasti trnu bylo napětí 453 MPa.

Z výsledků je patrné, že vyšší napětí bylo zjištěno také v oblasti můstku výronkové drážky, který je opatřen brzdou. V nové variantě geometrie 2. operace dochází k intenzivnímu vytlačování materiálu do oblasti výronku a tento v kontaktu s kovacími nástroji tlačí napětím cca. 350-400 MPa na tuto oblast kovacího nástroje.



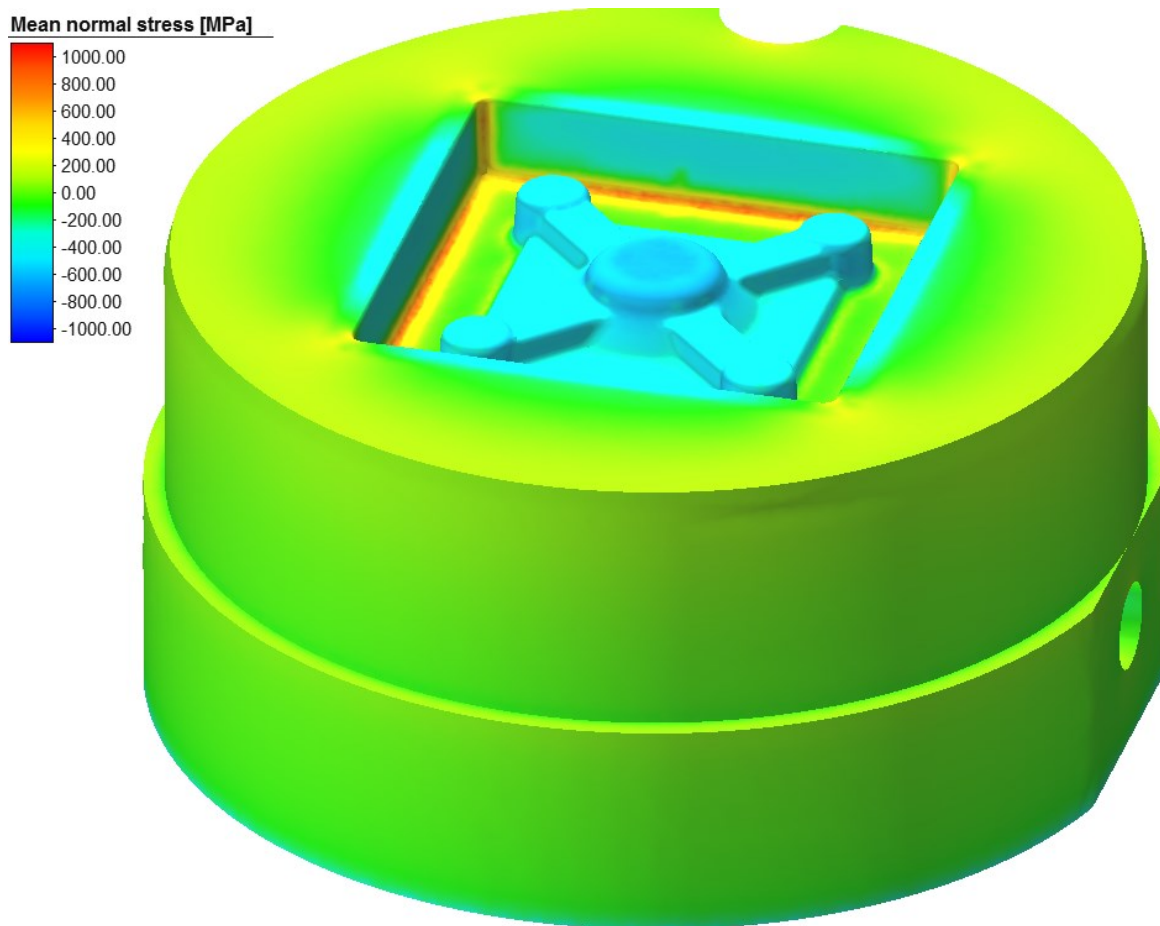
Obrázek 23 Průběh normálového napětí v horní zápustce 2. operace (nové provedení)

Navržené konstrukční úpravy ve 2. operaci měli vliv na průběh 3. operace (dokování), kdy bylo zjištěno snížení kovací síly. V maximálních hodnotách byla síla 13272,5 N pro horní zápustku a 13319,3 N v případě spodní zápustky (Obr. 24). Na snížení kovací síly měl vliv zvýšený poloměr zaoblení v 2. operaci. Podstatný vliv na velikost kovací síly má rovněž koncept oboustranného předkování otvoru, kdy s ohledem na předlisovací operaci dochází ve 3. operaci pouze k dokování na požadovanou tloušťku blány.



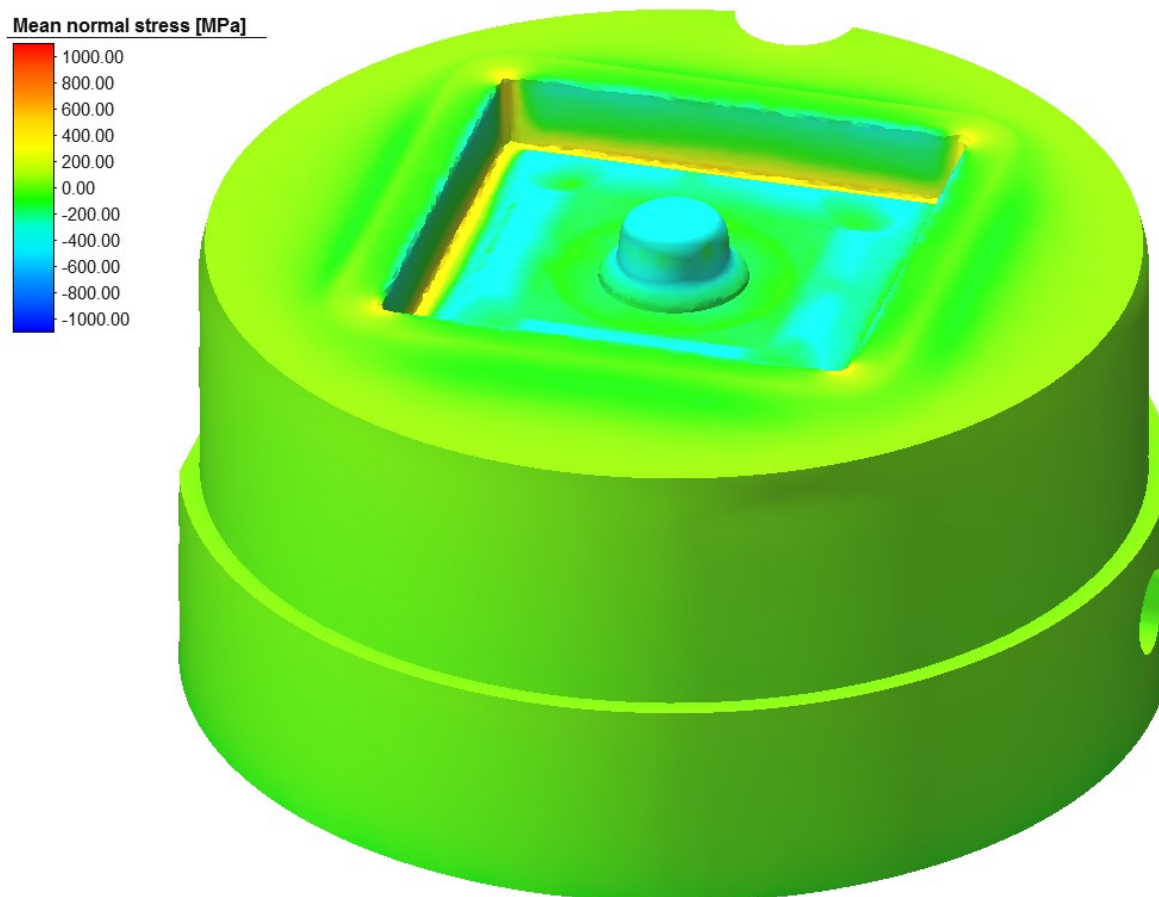
Obrázek 24 Průběh kovacích sil při procesu dolisování (nové provedení)

Z hlediska porovnání geometrií zápustek v původním a novém provedení není významný rozdíl mezi těmito návrhy. Konečný tvar kontury dutiny zápustky odpovídá požadavkům, uvedeným ve výkresové dokumentaci výkovku. V poslední operaci dochází ke kalibraci výkovku na finální rozměry a tvar. V porovnání s původní variantou je v novém konceptu kalkulováno s vykováním okrajových částí s malým poloměrem zaoblení až v poslední operaci. Lze tedy usuzovat, že vyšší napětí, bude vznikat v rohových částech dutiny spodní zápustky. Toto se potvrdilo výsledky simulace (Obr. 25), kdy bylo zjištěno, že v oblasti přechodových zaoblení je hodnota napětí v rozsahu 602-729 MPa. V místě trnu bylo zjištěno napětí v maximální hodnotě 498 MPa.



Obrázek 25 Průběh normálového napětí ve spodní zápustce 3. operace (nové provedení)

Horní zápustka je v průběhu procesu dolisování zatěžována pouze minimálně. V oblasti zaoblení se napětí pohybuje v rozmezí 361–496 MPa a napětí v místě trnu nabývá maximální hodnoty 403 MPa. Mírně zvýšená oblast namáhání horní zápustky je tvarová kontura, které je vykována až v poslední operaci ve finální fázi zaplnění dutiny zápustky. V tomto případě je již kov ochlazený na přibližnou teplotu 960°C a musí být kalkulováno se zvýšením deformačního odporu, který se projeví na výsledné síle a v konečném důsledku také na namáhání zápustky.

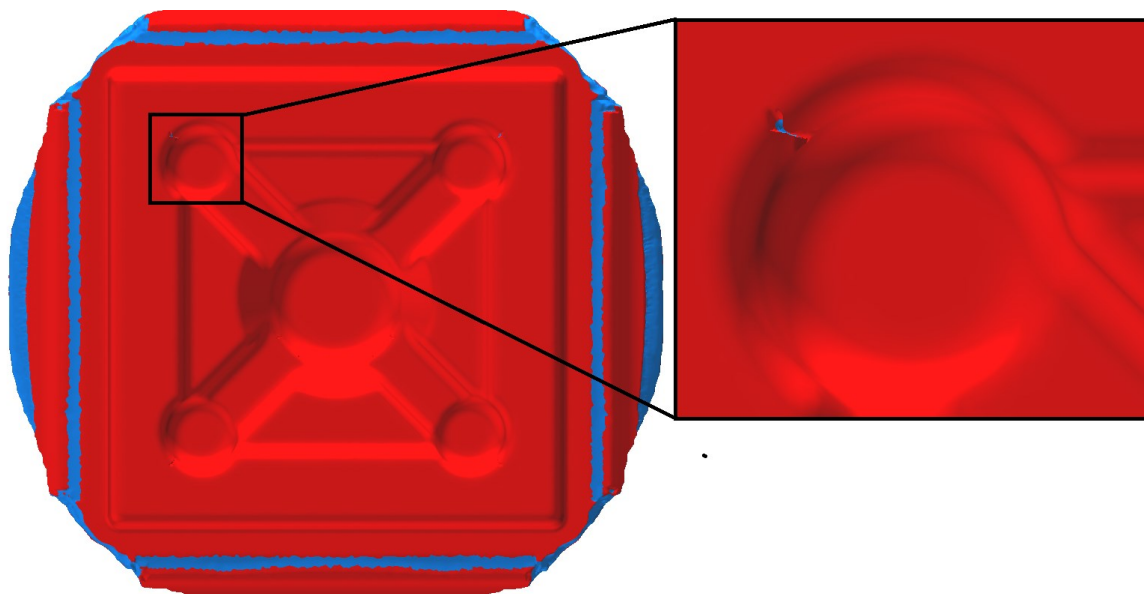


Obrázek 26 Průběh normálového napětí v horní zápustce 3. operace (nové provedení)

5 Celkové hodnocení dosažených výsledků

Porovnáním výsledků, dosažených provedením simulace procesu víceoperačního kování zadané součásti a simulace namáhání zápustek v jednotlivých operacích bylo prokázáno, že navržené změny v geometrii zápustek mají významný vliv nejen na vlastní kovací proces, ale současně snižují normálové napětí, které vede ke snížení životnosti tvarové zápustky, která by dle firemních požadavků měla, po dobu své životnosti, vykovat přibližně 10 000 ks výkovků. V případě velkého namáhání dochází ke snížení životnosti a tím ke snížení počtu vykováných kusů, což s sebou přináší nemalé finanční náklady.

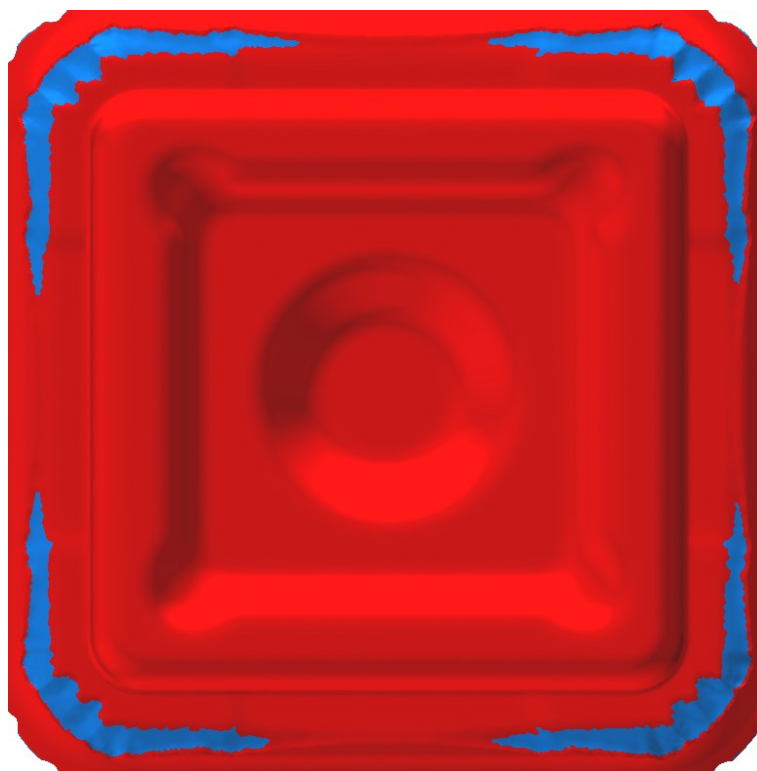
Při porovnání průběhů kování v zápustkách původního a nového provedení je důležité se zaměřit na 2. operaci (předlisování), které je z hlediska kovacího procesu nejdůležitější a rozdíly v geometrii zápustek jsou v této operaci markantní. V předlisovací operaci je požadavkem docílit, pokud možno finálního tvaru výkovku, tak aby v dolisovací operaci byla změna tvaru minimální. Zadaná součást má z hlediska složitosti komplikovaný tvar a tento je vyroben již ve 2. operaci (původní varianta). V první fázi předlisování je napěchovaný polotovar stlačován a je do něj vytlačen požadovaný tvar. Při kontaktu materiálu se dnem dutiny spodní zápustky je kov vytlačován do rohové části dutiny, kde dochází k vyplnění rohových částí s malým poloměrem zaoblení (v souladu s výkresovou dokumentací). Vzhledem k malému poloměru zaoblení může lokálně docházet ke vzniku trhlin, jak je ukázáno na obr. 27.



Obrázek 27 Tvar předlisovaného výkovku po 2. operaci při použití původní geometrie zápustek a místo iniciace trhliny na předkovaném tvaru

Další problém představuje relativně limitní vsádková hmotnost, resp. přídavek na výronek. V simulaci bylo zjištěno, že rohové části jsou zaplněny v poslední fázi předlisování a v případě, kdy by došlo ke špatnému založení napěchovaného polotovaru v této operaci, s velkou pravděpodobností by došlo ke vzniku tzv. nedokování.

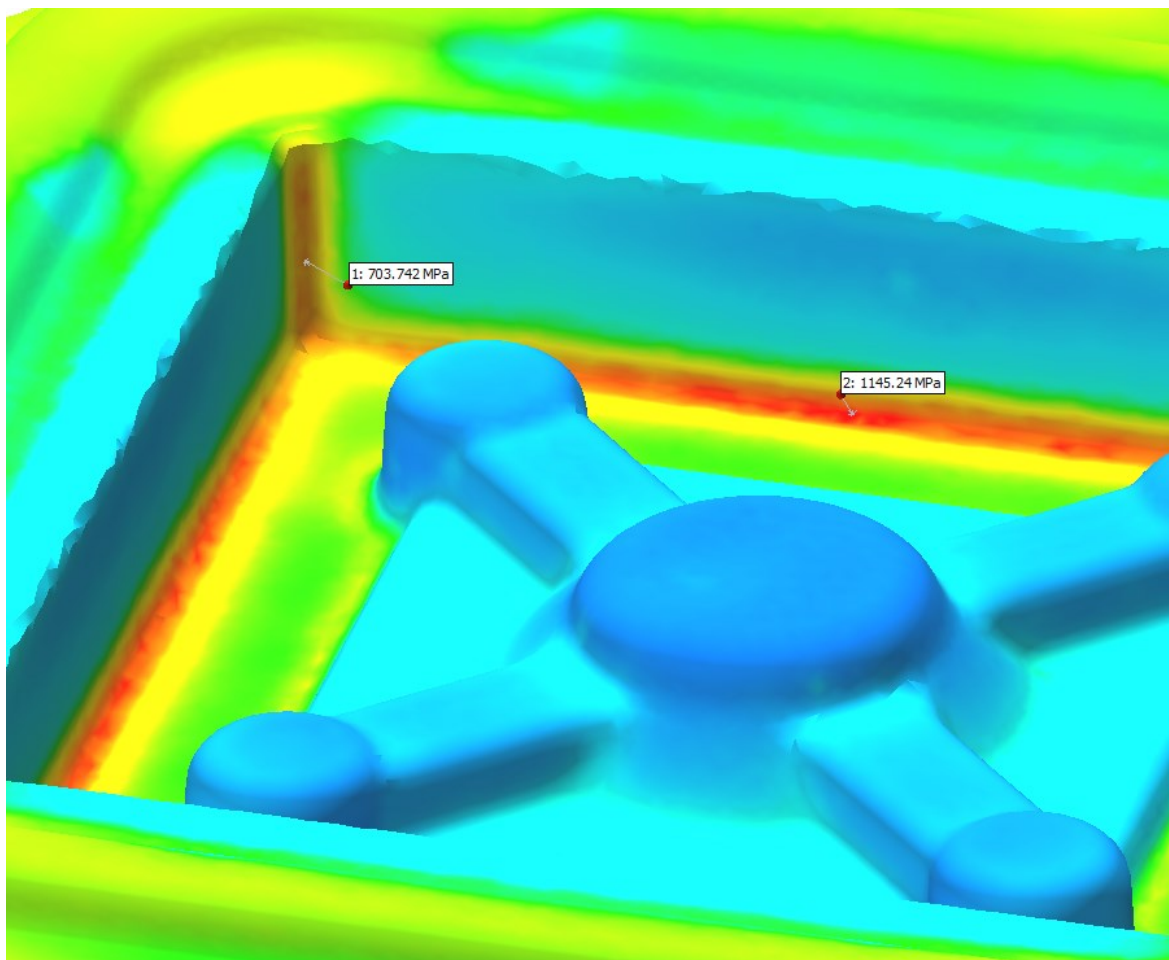
Výše uvedené závěry, které byly získány provedením simulace kování při použití modelů kovacíh nástrojů s původní geometrií posloužili k vytvoření nové geometrie zápustek v 2. operaci, která zaručí předlisování požadovaného tvaru a současně sníží síly, působící na zápustky. Nový koncept geometrie spočívá v úpravě poloměru zaoblení, který je nově zvýšen na R10 a současně nedochází k úplnému vykování tvarové části výkovku a tato je pouze naznačena a následně finálně vykována až ve 3. operaci. Další změnou je předkování průchozího otvoru již ve 2. operaci. Výsledek simulace kování při použití nové geometrie je uveden na Obr. 28. Z uvedeného snímku je patrná změna geometrie předlisovaného výkovku (v porovnání s tvarem, uvedeným na Obr. 27).



Obrázek 28 Tvar předlisovaného výkovku po 2. operaci při použití nové geometrie zápustek

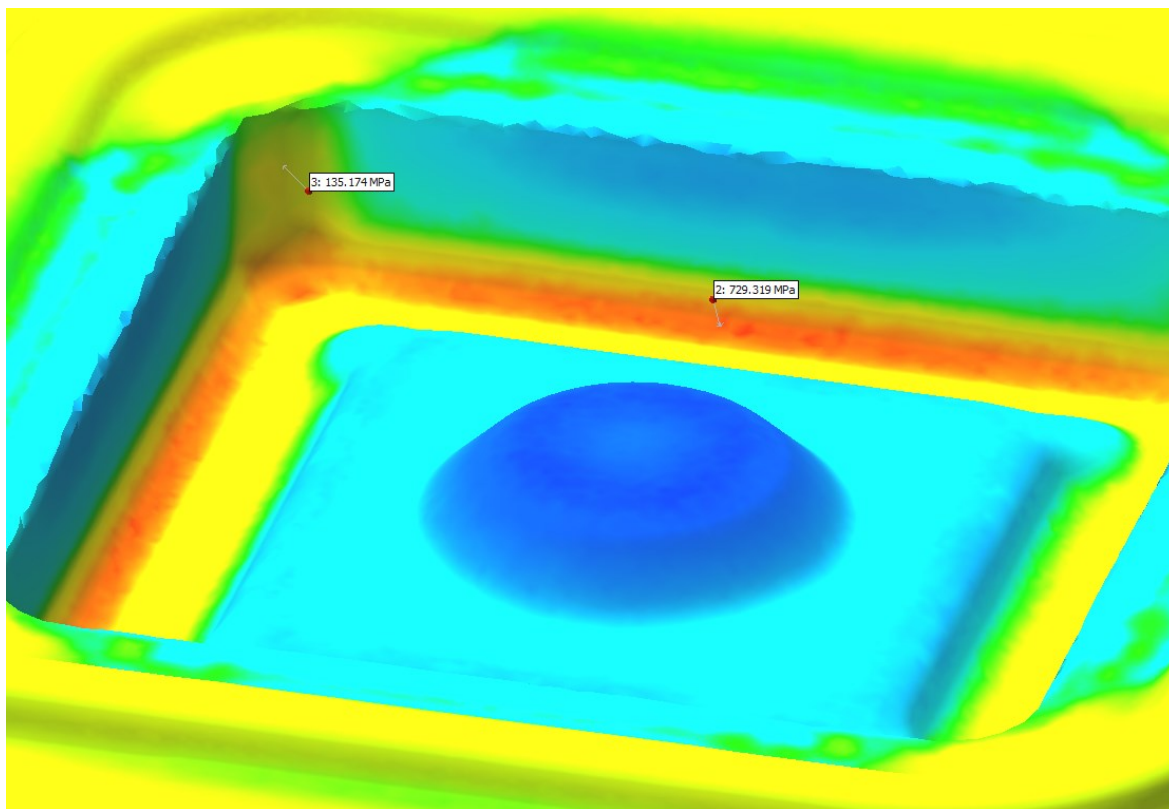
Simulace kovacího procesu představuje konečnou fázi přípravy výroby a poskytuje poslední možnost konstrukčních nebo technologických úprav. Simulační programy poskytují možnost využití výsledků ze simulace kování při stanovení kritických míst z hlediska namáhání. Tento modul je součástí programu Simufact.Forming, který byl použit při simulacích, jejichž výsledky jsou publikovány v této práci. K řešení optimalizace výroby daného výkovku byl použit také modul, predikující namáhání zápustek.

Prezentované výsledky simulace zatížení zápustek prokázali pozitivní vliv změny geometrie na hodnoty napětí při maximální kovací síle. Z hlediska problematiky kování je vždy více zatížena spodní zápustka a je tedy důležité se zaměřit na rozbor napětí spodní zápustky ve 2. operaci. Simulací bylo potvrzeno, že z hlediska namáhání je kritickým místem oblast zaoblení. S ohledem na směr napětí je tato oblast roztahována s maximálním napětím 1150 MPa a přes 700 MPa v rohové části výkovku. V detailním pohledu je to uvedeno v Obr. 29.



Obrázek 29 Normálové napětí při maximální kovací síle v 2. operaci (původní provedení)

Konstrukční úpravy na kovacích nástrojích pozitivně neovlivnily pouze vlastní proces kování, ale z hlediska namáhání bylo zjištěno významné snížení maximálních hodnot napětí v kritických oblastech, kterými v tomto provedení zůstalo zaoblení. V maximální hodnotě napětí je zápustka namáhána napětím cca. 730 MPa a v oblasti zaoblení rohové části je tato hodnota 150 MPa. Kritická místa a maximální hodnoty jsou uvedeny na Obr. 30.



Obrázek 30 Normálové napětí při maximální kovací síle v 2. operaci (nové provedení)

Závěr

Cílem práce byla analýza současného stavu kování dané součásti, která je z technologického hlediska obtížně kovatelná. S ohledem na materiálový aspekt a vliv malých poloměrů zaoblení dochází k významnému zatížení zápustek a v jejich důsledku vznikají oblasti s trhlinami a tím zvyšují výrobní náklady.

Praktická část je rozdělena na dvě samostatné části, které se zabývají využitím simulace procesu kování a simulace zatížení zápustek původního provedení a nové konstrukční varianty řešení kovacích nástrojů.

Výsledky simulace kování a zejména zatížení jednoznačně potvrdily omezující faktor zaoblení, který negativně ovlivňuje průběh kovacího procesu, kdy je dutina zápustek vyplněna v konečné fázi kování při operaci předlisování. S ohledem na předlisovaný tvar jsou 2. i 3. operace z hlediska namáhání a velikosti kovacích sil kritické.

Souhrnným vyhodnocením výsledků simulace kování a zatížení byly navrženy konstrukční úpravy v 2. a 3. operaci, které by, dle předpokladu, měli umožnit snížení napětí, koncentrovaném v oblasti zaoblení hran a přechodů, především v okrajových částí výkovku. Základní úpravou bylo zvýšení poloměru zaoblení hran a přechodů v okrajové části z původní velikosti R3 na R10 (2. operace) a zvýšení přechodových zaoblení ve tvaru dutiny spodní zápustky (oblast trnu pro předkování otvorů).

Vhodnost navržených konstrukčních úprav byla ověřena provedením simulace kování a zatížení při shodných podmínkách jako v případě původní varianty. Výsledky bylo jednoznačně potvrzeno, že zavedené úpravy významně ovlivňují průběh kovacích sil a vyplnění dutiny je plynulé (2. operace). Ve 3. operaci je dokován konečný tvar výkovku. Z hlediska zatížení se provedené změny projeví pozitivně. Kritická místa zůstala shodná, jako v případě původní varianty, ale hodnoty maximálních napětí byly významně nižší.

V práci bylo potvrzeno, že provedené změny ovlivňují nejen kovací proces, ale také namáhání kovacích nástrojů, které při kování vzniká. Dle tohoto předpokladu by nástroje měly mít vyšší životnost, a tedy náklady na renovace nebo výrobu zcela nových nástrojů by měli být nižší.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Ondřeji Hilšerovi, který mi významně pomohl při plnění jednotlivých zadaných cílů. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Brumarovi, který je vedoucím technologie v kovárně firmy Unex, a.s., a podával mi všechny podklady, které byly nezbytné pro vypracování této práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě po celou dobu studia na VŠ podporovala.

Seznam použité literatury

- [1] ELFMARK, J. a kol. *Tváření kovů*. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1992. 524 s.
- [2] HAŠEK, V. a kol. *Kování*. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 732 s.
- [3] HOSFORD, W. F. a kol. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 4. Vyd. New York: Cambridge University Press, 2011. 344 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [4] BRJUCHANOV, A. N. a REBELSKIJ, A. V. *Zápustkové kování-II. Díl: Konstrukce a výpočet nástrojů*. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1956. 352 s.
- [5] JÍLEK, L. Mají výkovky budoucnost?. *Kovárenství*. 2019, roč. 68, s. 3-6. e-ISSN 1213-9289.
- [6] ČERMÁK, J. Směry vývoje kovárenského průmyslu. *Kovárenství*. 2019, roč. 68, s. 7-15. e-ISSN 1213-9289.
- [7] ŚLIWA, R. E. a kol. Metal forming of lightweight magnesium alloys for aviation applications. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017, roč. 62, č. 3, s. 1559-1566. e-ISSN 1733-3490.
- [8] Forging manipulator (Railbound): SSM Series. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.dango-dienenthal.de/product/ssm-series/>.
- [9] DRASTÍK, F. a kol. Výpočty z oboru kování a lisování. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1972. 192 s.
- [10] KOTOUČ, J. a kol. *Tvářecí nástroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
- [11] GRONOSTAJSKI, Z. a kol. The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, roč. 657, č. 1, s. 147-160. e-ISSN 0921-5093.
- [12] EBARA, R. a kol. Failure analysis of hot forging dies for automotive components. *Engineering Failure Analysis*. 2008, roč. 15, č. 7, s. 881-893. e-ISSN 1350-6307.
- [13] HRUBÝ, J. a kol. Possibilities of prediction of service life of forming tools. *Manufacturing Technology*. 2013, roč. 13, č. 2, s. 178-181. e-ISSN 1213-2489.

- [14] FU, M. a kol. Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995, roč. 53, č. 3-4, s. 511-520. e-ISSN 0924-0136.
- [15] Abrams Stahlberater [cit. 2020-04-13]. Dostupné z:
http://www.stahlberater.de/alternativen/1.7131?gclid=Cj0KCQjwm9D0BRCMARIsAIfvfiZvhYJ0ucxpkfiLa82xo9ZeuVrIqjBk8qPSor41ob3YI85WNPvNaMAaAiYBEALw_wcB
- [16] ČSN EN 10243-1: *Ocelové zápustkové výkovky-Mezní úchylky rozměrů-Část 1: Výkovky kované na bucharech a svislých kovacích lisech*. Praha: Český normalizační institut, 2003.

Seznam příloh

Příloha A – Výkres výkovku (výkres č. 2_116_12/b)

Příloha B – Porovnání geometrie výkovku ve 2. operaci